

1'2012

ВИСОКІ ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ

HIGH TECHNOLOGIES
OF MACHINE-BUILDING

Збірник наукових праць

Printed scientific works

Харків НТУ «ХПІ» – 2012 – Kharkiv NTU «KhPI»

Редакційна колегія:

Везуб М. В., д.т.н. (відповідальний редактор),
Пуня Л. І. (зам. відповідального редактора),
Добросок В. Л., д.т.н., Залоза В. О., д.т.н., Зубар В. П., проф.,
Мовиш О. Я., д.т.н., Пермяков О. А., д.т.н., Тимофієв Ю. В. д.т.н.,
Турманідзе Р. С., д.т.н., Узуян М. Д., д.т.н., Фадеев В. А., проф.,
Федорович В. О., д.т.н., Балака О. В. (відповідальний секретар)

В збірнику представлені наукові праці, які присвячені вирішенню проблем в області високих технологій машинобудування. Розглянуті питання екологічно безпечного виробництва, сучасного інструментального забезпечення, використання 3D моделювання для конструювання інструментальних та робочих поверхонь, контролю поверхонь, які отримані за допомогою нанотехнологій, технологій мінімізації подання МОТС та ін. Для фахівців в області машинобудування, науково-технічних працівників і студентів.

Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків, НТУ «ХПІ», 2012. – Вип. 1 (22). – 338 с.

В сборнике представлены научные труды, которые посвящены решению проблем в области высоких технологий машиностроения. Рассматриваются вопросы экологически безопасного производства, современного инструментального оснащения, применения 3D моделирования для конструирования инструментальных и рабочих поверхностей, контроля поверхностей, полученных с помощью нанотехнологий, минимизации СОТС и др. Для специалистов в области машиностроения, научно-технических работников и студентов.

ББК 34.63

Матеріали відтворено з авторських оригіналів

ББК 34.63
УДК 621.91

© НТУ «ХПІ», 2012

УДК 621.91

А.М. Адашкин, канд. техн. наук; А.С. Верещака, д-р техн. наук;
А.А. Верещака канд. техн. наук; В.В. Каширцев, О. Хожаяв,
К.В. Крочков

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ РЕНИЯ В «Co-Re» СВЯЗКЕ НА РЕЖУЩИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

Визначено оптимальне співвідношення ренію і кобальту в «Co-Re» зв'язці твердих сплавів на основі аналізу діаграм стану та вивчення властивостей. Показано, що властивості зв'язки при однаковому співвідношенні в ній ренію і кобальту також однакові, і властивості твердих сплавів визначаються кількістю зв'язки в сплаві.

Ключові слова: тверді сплави, зв'язка, співвідношення ренію і кобальту в зв'язці.

Определено оптимальное соотношение рения и кобальта в «Co-Re» связке твердых сплавов на основании анализа диаграм состояния и изучения свойств. Показано, что свойства связки при одинаковом соотношении в ней рения и кобальта также одинаковы, и свойства твердых сплавов определяются количеством связки в сплаве.

The optimal ratio of rhenium and cobalt in the «Co-Re» bunch of hard alloys based on the analysis of phase diagrams and the study of the properties. It is shown that the properties of ligaments at the same ratio in its rhenium and cobalt are also the same, and the properties of hard alloys are determined by the number of cords in the alloy.

Key words: solid alloys, bond, the ratio of rhenium and cobalt in the bundle.

1. ВВЕДЕНИЕ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Условия эксплуатации машин, агрегатов, установок в ряде промышленных отраслей, определяющих уровень технического развития страны, характеризуются повышенными или высокими температурами. Это энергетика, транспорт, нефтехимическое производство, авиация, ракетостроение и космическая промышленность. При высоких температурах работают детали котлов, газовых турбин, реактивных двигателей, атомных реакторов и др. Их эксплуатация не возможна без применения специальных материалов, сохраняющих необходимую прочность при нагреве. Такие материалы обычно именуют жаропрочными.

Особенность жаропрочных сталей и сплавов, особенно на основе тугоплавких металлов, заключается в возможности сохранения высоких механических свойства не только до рабочих, но и до технологических температур. Последнее предопределяет их низкие технологические свойства и, в частности, обрабатываемость резанием, что связано с высокой прочностью, повышенной сопротивляемостью пластическому деформированию, недостатком технологической пластичности и сохранения этих свойств до высоких температур [1]. Как правило, при резании труднообрабатываемых жаропрочных материалов возникают высокие температуры и реализуются механизмы

высокотемпературного изнашивания инструмента и, как следствие, резко снижается его стойкость.

Инструментальный материал должен обладать высокой жаропрочностью (теплостойкостью – этот термин применяется для инструментальных материалов, он оценивает способность сохранять твердость при нагреве) и жаростойкостью (сопротивлением окислению при высоких температурах).

Двухкарбидные твердые сплавы (типа ТК) при обработке жаропрочных материалов не используются из-за недостаточной прочности. Обработка более прочными, но менее теплостойкими, однокарбидными твердыми сплавами связана с необходимостью уменьшения скоростей резания, т.е. снижением производительности обработки [2].

В ранних работах [3] было показано, что теплостойкость твердых сплавов лимитируется низкими температурами разупрочнения, т.е. недостаточной жаропрочностью металла связки – кобальта. Повышение жаропрочности связки и, таким образом теплостойкости твердых сплавов, может быть достигнуто легированием не карбидообразующими тугоплавкими металлами, которые должны образовывать с кобальтом твердые растворы. Этим требованиям отвечает рений - тугоплавкий металл – температура плавления ($T_{пл}$) 3450°C, который в качестве легирующего компонента был введен в ряд твердых сплавов.

Целью настоящей работы является обоснование оптимального содержания рения в однокарбидных сплавах типа ВК (карбид WC) и оценка эффективности выпускаемых промышленностью рений-содержащих твердых сплавов.

2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ.

Для оценки влияния рения были исследованы сплавы с массовой долей связки 10 и 15% и различным соотношением Re и Co в связке, их состав приведен в табл.1, а также сплавы ВРК12, ВРК13 и ВРК15, выпускаемые промышленностью.

Таблица 1 – Состав исследуемых сплавов.

Тип сплава	Состав, % масс			Расчетное (фактическое) соотношение Re:Co
	Re	Co	WC	
ВРК10	3,8	5,8	90,4	40:60 (60,4:39,6)
	4,9	4,5	90,6	50:50 (51:49)
	5,6	3,94	90,46	60:40 (58,7: 41,3)
	6,75	2,9	90,35	70:30 (70:30)
ВРК15	5,95	9,1	84,95	40:60 (60,4:39,6)
	7,5	7,4	85,1	50:50 (50,3:49,7)
	8,75	6,12	85,13	60:40 (58,8:41,2)
	9,5	4,9	85,6	70:30 (66:34)
Промышленные сплавы				
ВРК12	2,8	8,6	88,6	25:75
ВРК13	5,9	7,1	87	45:65
ВРК15	8,7	6,2	85,1	58:42

Твердость при комнатной и повышенных температурах определяли на установке ВИМ-1, на образец наносили 3...5 отпечатков. На рисунках приведены средние значения. Погрешность - ± 10%.

Определения прочности при изгибе ($\sigma_{изг}$) выполняли: при комнатной температуре на установке ЦДМУ-30; при повышенных температурах – на установке «Инстрон». Образцы 5×5×35; пять образцов на точку. Погрешность - ± 15%. (Определения механических свойств опытных сплавов и их структуры выполнены З.Н. Сапроновой). Металлографический анализ для определения пористости и величины размеров карбидов проводили по стандартным методикам. Температуру начала интенсивного окисления определяли на дериватографе Q-1500D по отклонению кривой ДТА. Увеличение массы образцов проводили взвешиванием на химических весах, точность - 0,1 мг. Толщину оксидной пленки оценивали измерением размера образца до и после нагрева с помощью микрометра.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Влияние рения на жаропрочность связки

Жаропрочность определяется сопротивлением материалов ползучести, зависящим от сил межатомных связей, которые характеризуются, в первую очередь, температурой плавления материала. Чем выше $T_{пл}$, тем прочнее межатомные связи, сопротивление ползучести материала и его жаропрочность [1].

Однако, это положение справедливо только для сплавов, не претерпевающих полиморфного превращения. Силы межатомных связей и температура разупрочнения у металлов и сплавов с полиморфным превращением определяются температурой именно этого превращения, а не температурой плавления. При температурах, близких к температуре полиморфного превращения, усиливается диффузионная подвижность атомов, снижаются силы межатомных связей и, как следствие, механические свойства [1, 4]. Экспериментально это доказано в работе [4], в которой для инструментальных сталей установлена зависимость температуры начала разупрочнения ($T_{разупр}$) не от температуры плавления, а от температуры полиморфного ($T_{\alpha \rightarrow \gamma}$) превращения ($T_{разупр} = 0,7...0,8 T_{\alpha \rightarrow \gamma} + K$).

Чистый кобальт имеет две модификации – низкотемпературную - гексагональную плотноупакованную (ГПУ; ϵ - фаза) и высокотемпературную кубическую гранцентрированную связки существенно выше. Это ГЦК; α - фаза. Полиморфное $\epsilon \leftrightarrow \alpha$ превращение кобальта происходит при температуре 422°C [5]. Однако, жаропрочность связки существенно выше. Это объясняется тем, что связка твердых сплавов это не чистый кобальт, а твердый раствор углерода и вольфрама (карбида WC) в кобальте [6]. При этом температура полиморфного $\epsilon \rightarrow \alpha$ превращения повышается (линия A_5 на рис. 1) примерно на 40°C с увеличением концентрации WC на 1%. При предельной растворимости WC в кобальте ~ 9% температура полиморфного превращения ~ 950°C.

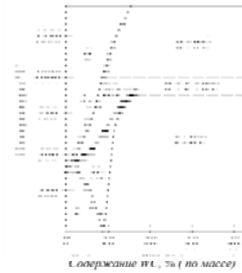


Рисунок 1 – Низкотемпературная часть разреза по линии Co – WC диаграммы состояния «WC - Co» [11].

При легировании кобальта вольфрамом и углеродом реализуется один из механизмов повышения жаропрочности - за счет образования легированного твердого раствора [1]. Однако, кобальтовая связка, даже легированная вольфрамом и углеродом, претерпевает полиморфное превращение (см. рис. 1), это снижает ее жаропрочность и, таким образом, теплоустойчивость твердого сплава.

Упрочнение связки твердых сплавов за счет введения в сплав рения также достигается за счет получения легированного твердого раствора. Рений не образует собственных карбидов [2, 5], он входит в состав связки, меняя ее химический состав. Кристаллическая решетка рения – ГПУ, такая же, как у низкотемпературной модификации кобальта. Кобальт и рений образуют непрерывный ряд твердых растворов (рис. 2 – диаграмма состояния «Co - Re»).

Для оценки влияния рения на структуру и свойства связки следует учитывать его содержание в связке, а не в сплаве. В работах ВНИИТСа было показано, что в связке, содержащей рений, растворимость WC ниже, чем в кобальте, и расположение двухфазных областей в системах «WC – Co - Re» и бинарной «WC – Co» практически одинаково [10]. Это позволяет определять структуру связки (весь рений находится в связке) с помощью диаграммы состояния «Co - Re» независимо от ее количества в сплаве. Т.е. при одинаковом соотношении Re и Co в связке структура связки будет одинакова (в соответствии с диаграммой), независимо от ее массового количества в сплаве. (Например, если количество связки в сплавах 10 и 15% масс, а количество рения в сплавах 7% и 10,5% масс, соответственно, структура связки в обоих случаях определится диаграммой «Co - Re» - она будет соответствовать сплаву с 70% Re).

Влияние рения на теплоустойчивость (твердость при нагреве) и прочность твердых сплавов исследовали на сплавах, в которых количество связки составляло 10 и 15% (сплавы типа ВРК10 и ВРК15). Содержание рения в связке этих сплавов соответствовало ~ 40, 50, 60 и 70% масс, соответственно (см. табл.1).

В интервале концентраций рения примерно до 52...53% масс (линия «ab») температура начала разупрочнения регламентируется $\epsilon \rightarrow \alpha$ полиморфным превращением. При большем содержании рения сплавы системы «Co - Re» не претерпевают полиморфного превращения (см. рис. 2). Температура разупрочнения (жаропрочность) связки твердых сплавов, содержащей более 52% рения, определяется температурой начала плавления – линией солидус (линия «bc»). Она тем выше, чем больше в сплаве рения.

Анализ диаграммы состояния «Co - Re» показывает, что введение в твердый сплав (в связку) рения наиболее эффективно до ~ 50% масс (более крутой подъем линии «ab», чем «bc» - см. рис. 2).

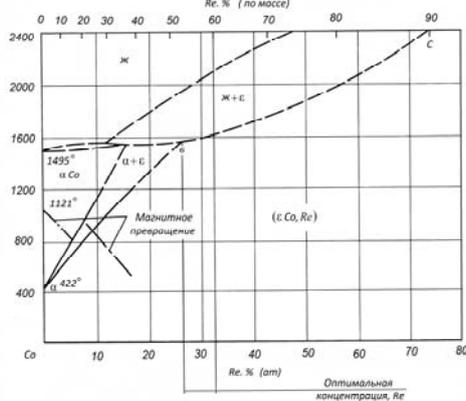


Рисунок 2 – Диаграмма состояния «Co-Re»

Поскольку состав связок в сплавах ВРК10 и ВРК15 при равной концентрации рения в связке одинаков, разница в свойствах этих сплавов определяется количеством связки в сплаве. Чем больше в сплаве связующей фазы, тем прочнее сплав, но его твердость ниже. Действительно, при всех температурах

испытаний твердость сплавов типа ВРК10 выше, а их прочность ниже (рис. 3 и 4).

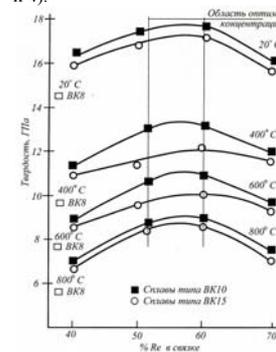


Рисунок 3 – Влияние количества рения в связке на твердость сплава ВРК

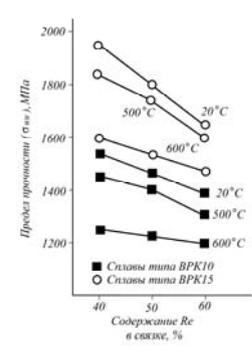


Рисунок 4 – Влияние количества рения в связке на прочность твердого сплава ВРК

Предполагалось, что повышение содержания рения в связке приведет к непрерывному росту жаропрочности, т.е. и теплоустойчивости сплавов. Однако, для всех исследованных температур были получены зависимости с экстремумом в области 52...60% рения в связке (рис. 3). При этом твердость сплавов типа ВРК при всех исследованных температурах была выше, чем у сплава ВК8, несмотря на то, что количество связки - фазы, снижающей твердость твердых сплавов, в этих сплавах больше (в сплаве ВРК15 – практически в два раза), чем в сплаве ВК8.

Снижение твердости при повышении содержания рения до 70% в связке связано, по-видимому, с технологическими факторами. Рений, по сравнению с кобальтом, обладает большими значениями модуля упругости (470 и 217 ГПа) прочностью при сжатии, (200 и 130 МПа), повышение содержания рения в сплавах «Co - Re» снижает их пластичность [3]. Это требует больших энергетических затрат при производстве сплавов, т.е. прежде всего повышение температуры спекания. Увеличение количества рения в связке до 70% требует повышения температуры спекания с 1500 до 1700...1900°C. Это увеличивает размеры карбидных частиц с 1,5 до 2,5 мкм (в среднем) и снижает жаропрочность (теплоустойчивость), т.к. для сплавов, предназначенных для краткосрочной эксплуатации при высоких температурах (режущий инструмент), оптимальной является мелкозернистая структура, упрочненная дисперсными частицами второй фазы [1], в данном случае карбидной.

Кроме того, более высокая прочность и меньшая пластичность связки с повышенным содержанием рения определяет увеличение пористости и, следовательно, снижение прочности. Пористость возрастает с 0,02 до 0,04% (объемн.) при увеличении содержания рения в связке от 40...50 до 60% и до 0,1% объемн. при содержании рения в связке 70%.

Влияние количества связки на твердость наиболее сильно проявляется при температурах 400 и 600°C. При этих температурах преимущество сплавов с меньшим количеством связки (ВРК10 по сравнению с ВРК15) наиболее заметно (см. рис. 3). Повышение температуры выше 600°C сопровождается заметным окислением связки и потере ее свойств (табл. 2), это нивелирует разницу для сплавов с разным содержанием рения.

Таблица 2 – Влияние состава твердого сплава на жаростойкость.

Сплав	Масса связки, %	Масса рения, %		$t_{окс}$, °C	Δm , мг	h, мм
		в сплаве	в связке			
ВК6	6	-	-	620	115	1,1
ВК10	10	-	-	605	130	1,25
ВРК12	11,4	2,8	24	625	94	1,09
ВРК13	13	5,9	45	638	77	1,0
ВРК15	14,9	8,7	58	657	48	0,6

Жаростойкость твердых сплавов определяется свойствами связки, т.к. монокристалл вольфрама WC обладает весьма высокой химической стойкостью при комнатной температуре и нагреве [7, 8].

Следовательно, увеличение массы связки в твердом сплаве должно снижать его жаростойкость. Это подтверждается сравнением характеристик жаростойкости сплавов ВК6 и ВК10 (см. табл.1).

Твердые сплавы с рением (типа ВРК) обладают более высокой жаростойкостью, чем вольфрам – кобальтовые (типа ВК). При большем количестве связки показатели жаростойкости этих сплавов выше.

Жаростойкость сплава ВРК15 выше, чем у сплавов ВРК12 и ВРК13, несмотря на большее количество связки в этом сплаве (см. табл. 1). Это связано с содержанием рения в связке – и масса привеса, и толщина оксидной пленки медленно снижаются при повышении содержания рения в связке от 25 до 45% масс и резко при дальнейшем увеличении содержания рения до 60% (рис. 5). Можно предположить, что повышение температуры плавления связки (она тем выше, чем больше в связке рения) определяет более сильные межзатонные связи и большую устойчивость против окисления.

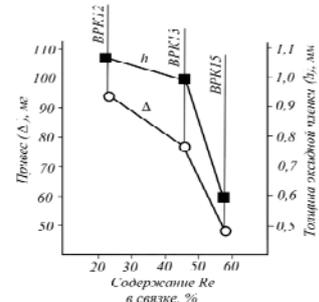


Рисунок 5 – Влияние содержания рения на жаропрочность твердых сплавов (по привесу массы мг) и толщине оксидной пленки (h, мм).

3.2. Стойкостные исследования

Объектом исследования служили сменные многогранные пластины (СМП) квадратной формы 12,7x12,7x4,75 мм (форма SNUN по стандарту ISO и 03111-0363 по ГОСТу 19042-80), из твердых сплавов ВРК10, ВРК13 и ВРК15 с радиусом при вершине $r = 0,8$ мм и радиусом округления режущей кромки $\rho = 15$ μ m. Для сравнения использовали также СМП из сплава ВК10-ХОМ с аналогичными значениями радиусов r и ρ , рекомендованных для обработки жаропрочных сплавов. Использовали режущие инструменты с механическим креплением СМП, которые имели следующие значения геометрических параметров режущей части: $\gamma = -8^\circ$; $\alpha = 6^\circ$; $\phi = \phi_1 = 45^\circ$; $\lambda = 0$. Исследования проводили при продольном точении всухую жаропрочного сплава ХН777ЮР (19-22 % Cr; 2,4-2,8 Ti; 1% Al, $\sigma_b = 930-1080$ МПа) на универсальном токарном станке 16К20 с тиристорным приводом, позволяющим поддерживать заданную скорость резания при уменьшении диаметра заготовки за счет бесступенчатого регулирования частоты вращения шпинделя станка. При проведении стойкостных исследований критерием отказа инструмента служила величина предельного изнашивания задней поверхности СМП равная $h_3 = 0,45-0,5$ мм.

Результаты стойкостных исследований представлены на рис.6, анализ результатов которых позволяет отметить следующее.

Стойкость инструментов, оснащенных СМП из сплавов ВРК существенно превосходила стойкость инструментов из стандартных СМП ВК10-ХОМ, рекомендованных для обработки жаропрочных сплавов на никелевой основе.

Стойкость пластин ВРК10 (кривая 2, рис 6) несколько уступает стойкости пластин ВРК13 и ВРК15 (см. кривые 3 и 4, рис.6). Инструменты оснащенные СМП из сплава ВРК13, имели худшую стойкость инструментов оснащенных СМП из сплава ВРК15 на 15-20 %.

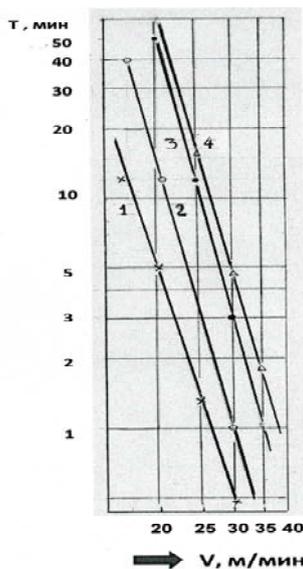


Рисунок 6 – Влияние скорости резания на стойкость инструмента, оснащенного сменными многогранными пластинами с различными твердыми сплавами: 1 – ВК10ХОМ; 2 – ВРК-10; ВРК-12; 3 – ВРК-13; 4 – ВРК-15.

При выборе оптимального состава твердого сплава типа ВРК, следует иметь в виду высокую стоимость рения. Его количество может быть меньше, чем в сплаве ВРК15, за счет снижения массовой доли связки. Поскольку раз-

ница прочности (при одинаковом содержании рения в связке) сплавов ВРК15 и ВРК10 достаточно большая, то целесообразно использовать сплавы с большим, чем 10% масс, количеством связки. Это могут быть сплавы типа ВРК12 или ВРК13 с оптимальным содержанием рения (52% в связке), т.е. 6,2% масс - в сплаве ВРК12 и 6,7% масс - в сплаве ВРК13. Твердость (теплостойкость) таких сплавов будет несколько выше, чем сплава ВРК15. Исследования (см. рис 6) показали несущественное снижение прочности этих сплавов, по сравнению со сплавом ВРК15. Меньшее количество связки в этих сплавах будет компенсировано пониженным, по сравнению со сплавом ВРК15, содержанием рения в связке – 52, а не 58% (масс.)

Заключение.

На основании анализа диаграммы состояния «Co - Re» установлено оптимальное содержание рения в твердых сплавах, обеспечивающее их максимальную теплостойкость и жаростойкость. Фазовый состав и свойства связки при равном содержании в ней рения одинаковы, независимо от количества связки в сплаве. При оптимальном содержании рения свойства твердых сплавов определяются количеством связки, а не содержанием рения в сплаве. В этой связи можно рекомендовать применение рациональные составы твердых сплавов, экономно легированных дорогостоящим рением. К оптимально легированным кобальт-рениевым сплавам можно отнести сплавы ВРК12 и ВРК13.

Список использованных источников. 1. С.Б. Масленков. Жаропрочные стали и сплавы. Справочник. М. Металлургия. 1988. 191 с. 2. В.Ф. Бобров. Основы теории резания металлов. М. Машиностроение. 1975. 344с. 3. Чапорова В.И., Кузнецова Т.Ф. Некоторые закономерности взаимодействия тугоплавких металлов с металлами группы железо. Твердые сплавы. 1973 № 14 с.49 – 53. 4. Кремнев Л.С. Легирование и термическая обработка инструментальных сталей и сплавов / Справочник «Металловедение и термическая обработка стали». Под ред. М.Л. Бернштейна и А.Г. Рахпаганта. М.: Машиностроение. 1983. Т. II. С. 298 – 318. 5. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Под ред. Н.П. Лапишева. М. Машиностроение. Т.1. 911 с. 6. В.И. Третьяков. Основы металловедения и технология производства спеченных твердых сплавов. М. Metallurgia. 1976. 527 с. 7. Р. Киффер, П. Шварцкопф. Твердые сплавы. Научно-техническое издательство по черной и цветной металлургии. М. 1957. 664 с. 8. Г.В. Самсонов. Тугоплавкие соединения. Научно-техническое издательство по черной и цветной металлургии. М. 1963. 398 с. 9. В.С. Самойлов. Металлообработка твердосплавным инструментом. Справочник/ В.С. Самойлов, В.Ф. Эйхманс, В.А. Фальковский, А.Д. Локтев, Ю.П. Шкурин. М. Машиностроение. 367 с. 10. Иютина И.А., Куприна В.В., Соколовская Е.М., Спасов И.А. Исследование взаимодействия рения с кобальтом и никелем. В сб. Исследование и применение сплавов рения. М. Наука. 1975. с. 54-56. 11. Giamei I., Curta J., Rabin S. «Cobalt», 1968. №40 p. 140-157.

В.С. Антонюк, д-р. техн. наук, Київ, Україна,
М.А. Бондаренко, канд. техн. наук, М.П. Рудь, канд. техн. наук,
І.В. Яценко канд. техн. наук, Черкаси, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ТОНКИХ АЛМАЗОПОДІБНИХ НАНОСТРУКТУР НА РІЗАЛЬНОМУ ІНСТРУМЕНТІ ТЕРМІЧНИМ ОСАДЖЕННЯМ У ВАКУУМІ

В статті розглянуто умови отримання тонких алмазоподібних нанометричних структур на різальному інструменті термовакuumним осадженням. Приведені геометричні характеристики і хімічна чистота матеріалу, який підлягає осадженню, режими формування та відсотковий вміст осаджуваних матеріалів.

В статье рассмотрено условия получения тонких алмазоподобных нанометрических структур на режущем инструменте термовакuumным осаждением. Приведены геометрические характеристики и химическая чистота материала, который подлeжит осаждению, режимы формирования и процентное содержание осаджених материалов.

Terms of receipt thin diamond-like nanometrical structures on a toolpiece thermal and vacuum besieging were considered in the article. Geometrical descriptions and chemical cleanness of material that is subject to besieging, the modes over of forming and percentage of the besieged materials were brought also.

Вирішення проблеми створення різального інструменту з оптимальними фізико-механічними і теплофізичними властивостями пов'язано з суттєвими складностями, що полягають у комплексному поєднанні характеристик, які в багатьох випадках є взаємовиключними. Впровадження технологій нанесення зносостійких покриттів дозволить підвищити стійкість і надійність різального інструменту, збільшити продуктивність обробки та скоротити витрати матеріалу [1].

Одним з перспективних шляхів при створенні інструменту, є використання спеціальних зносостійких покриттів, здатних формувати в поверхневих шарах інструменту склад та властивості матеріалу, дозволяючи поєднувати такі параметри, як міцність, твердість, в'язкість, зносо- і теплостійкість, втормлену міцність тощо [2].

До таких покриттів відносяться тонкі алмазоподібні структури мають унікальні властивості, такі як надзвичайно висока твердість, теплопровідність, великий питомий опір і тому знаходять широке застосування при виготовленні інструментальної бази точного приладобудування, машинобудування, в теплоенергетиці, авіакосмічній техніці тощо [3, 4].

Відомо [5], що у більшості випадків специфічні властивості тонких алмазоподібних структур обумовлюються різними типами дефектів, багато з яких можуть бути виявлені за допомогою електронної мікроскопії. В цьому

13

відношенні є повністю неврегульовані полікристалічні алмази, карбонадо Проте їх ідентифікація стикається з величезними труднощами, оскільки мікрокристали в цих плівках, як правило, частково орієнтовані [6].

Метод формування алмазоподібних наноструктур на різальному інструменті термічним осадженням у вакуумі є перспективним завдяки своїм перевагам, а саме: низькій технологічній температурі, відсутності структурних перетворень та деформацій, незначній товщині покриття, що виключає подальшу механічну обробку [3].

Тому, дослідження, які показали можливість формування тонких (до 5 нм) композиційних покриттів (у тому числі, алмазоподібних) з впорядкованою структурою, сформованою на поверхні різального інструменту при використанні технології термовакuumного осадження, і подальша оптимізація режимів технології осадження дозволить значно удосконалити процес формування та підвищити ступінь впорядкованості отримуваних алмазоподібних структур [7].

Метою роботи є вивчення умов формування тонких алмазоподібних структур покриття різального інструменту термовакuumним осадженням.

Основний матеріал досліджень. В основі розробленої технології отримання тонких алмазоподібних структур на поверхні різального інструменту лежить процес пошарового формування на субстраті бінарних структур Cu-C; Cu-C-Cu-C в процесі їх резистивного випаровування у вакуумі порядку $(2...3) \cdot 10^{-3}$ Па. Ідея створення саме таких алмазоподібних структур полягала в тому, що крок кристалічної решітки сформованих шарів та енергія активації поверхні осаджуваних покриттів близькі.

В навчально-науковому Центрі "Мікронанотехнології та обладнання" (м. Черкаси, Україна) розроблений метод комбінованого термовакuumного формування впорядкованих наноструктур на провідних та діелектричних поверхнях, в основу якого покладено термічне осадження у вакуумі тонких і ультратонких (товщиною 5...8 нм) високооднорідних покриттів з подальшим формуванням на них впорядкованих структур нанометричних розмірів. Як було показано в роботі [8], така комбінована технологія дозволяє отримувати сумірні структурні елементи, що мають високу впорядкованість.

Осадження алмазоподібних структур проводилося на вакуумному посту "ВУП-5" за двома схемами: Cu (85%)-C (15%); Cu (50%)-C (15%)-Cu (15%)-C (15%). Вихідною речовиною для отримання таких покриттів на зразках був прокалібрований за розмірами частинок порошок Cu («хч»), дисперсність – 2,6...3,0 мкм) та С (графіт, «хч», дисперсність – 0,8...1,2 мкм).

Цей матеріал вибирався виходячи з результатів приведених в роботі [8], у якій показана можливість формування на поверхні тонкого графітового покриття наноструктур з мікрометричними лінійними розмірами та товщиною приблизно 15 нм, що, пов'язано з дисперсністю матеріалу, що наноситься і особливостями будови кристалічної решітки графітового покриття.

14

Відпрацювання режимів формування тонких покриттів здійснювалося на універсальному вакуумному посту ВУП-5, а отримання впорядкованих наноструктур на робочих поверхнях різального інструменту проводилося на модифікованій вакуумній установці УВН-71.

Зразки отримані методом дискретного термічного випаровування у вакуумі порядку $(2...3) \cdot 10^{-3}$ Па на модифікованій технологічній вакуумній установці УВН-71 за режимами: сила струму випаровування для міді – $I_{Cu} = 45...60$ А, для вуглецю $I_C = 140...155$ А; час осадження у вакуумі для міді – $t_{Cu} = 90...110$ с, для вуглецю – $t_C = 280...330$ с; маса наважок для міді – $m_{Cu} = 40$ мг, для вуглецю – $m_C = 18$ мг.

Товщину отриманих покриттів вимірювали двома методами.

В процесі осадження – методом кварцового резонатора, що дозволило підібрати необхідну швидкість осадження ($\sim 0,1...1$ нм/с).

В подальшому отримане покриття вимірювали методом оптичної інтерферометрії Лінніка на приладі МІІ-4.

Товщина отриманих покриттів становила: для зразків отриманих за першою схемою: 95...110 нм (Cu) та 15...20 нм (C); для зразків отриманих за другою схемою: 65...75 нм (Cu^I), 25...30 нм (C^I), 25...30 нм (Cu^{II}), 25...30 нм (C^{II}).

Дослідження мікрорельєфу сформованих покриттів, проводилося на растровому електронному мікроскопі "Zeiss Ultra Plus" фірми "Carl Zeiss" (Німеччина), що дозволило судити про характер взаємодії матеріалу субстрату з матеріалом покриття виявило високу впорядкованість алмазоподібних структур (ступінь впорядкованості 82,85%, знеорієнтованість високодисперсних блоків величиною менше 0,01 мкм - 1,5...3%).

Мікροгеометрія поверхні нанесених покриттів і границя «покриття-субстрат» досліджувались методом атомно-силової мікроскопії на приладі «NT-206V» (виробник: ОДО «Мікротестмашини», Беларусь) з кремнієвими зондами «Ultrasaphr CSC12», системою мікропозиціонування і встроєним оптичним довгофокусуючим мікроскопом Logitech. Вимірювання мікрорельєфу поверхні зразків проводили в статичному режимі на ділянках поверхні, максимальним розміром 13×13 мкм, згідно з розробленими методиками та рекомендаціями [9].

Обговорення результатів дослідження. В результаті проведених досліджень встановлено, що за наведених вище режимів можна отримати впорядковані багатшарові бінарні структури на робочих поверхнях інструменту для прецизійної мікрообробки.

Так, на рисунку 1 представлено електронно-мікроскопічне зображення сформованих на поверхні прецизійного мікробору впорядкованих структур Cu-C (а) та Cu-C-Cu-C (б), при цьому середній розмір осаджуваних часток складає 1,8...2,2 мкм.

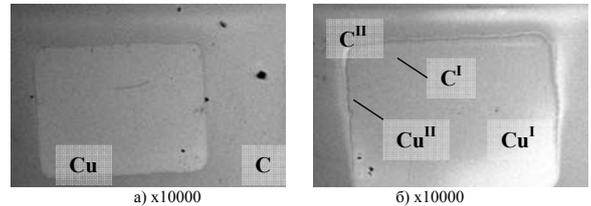


Рисунок 1 – Електронно-мікроскопічне зображення сформованих на поверхні прецизійного мікробору впорядкованих структур Cu-C (а) та Cu-C-Cu-C (б) (середній розмір осаджуваних часток 1,8...2,2 мкм).

В ході проведених експериментів встановлено, що істотний вплив на формування впорядкованих алмазоподібних наноструктур робить не стільки товщина осаджених покриттів, скільки геометричні характеристики та хімічна чистота матеріалу, який підлягає осадженню. Критична температура зразка на якому методом термовакuumного осадження формувалося покриття складає 780 К.

Утворене за умов дотримання критичної температури бінарне алмазоподібне покриття Cu-C є розвиненим (відношення фактичної площі покриття до площі досліджуваної ділянки 1,8:1) та має відносно поруватість порядку 0,117 (відносна поруватість поверхні вихідних зразків з інструментальної сталі складає 0,201).

На рисунку 2 представлено мікрорельєф ділянки поверхні алмазоподібного покриття та мікропрофіль шару алмазоподібного покриття – основний матеріал. При цьому, як видно з рисунку 2, б середньоарифметичне значення мікронерівностей поверхні утвореного алмазоподібного покриття складає 168 нм, що значно менше за значення мікронерівностей вихідної поверхні (~ 620 нм), а саме покриття може служити основою для нанесення на нього функціонального покриття.

Дослідження із застосуванням методів електронної та атомно-силової мікроскопії поверхонь зразків, отриманих за обома схемами, формування покриттів на яких відбувалося за температури вище 780 К показало утворення алмазних структур, які формувалися на бінарній структурі (рисунку 3).

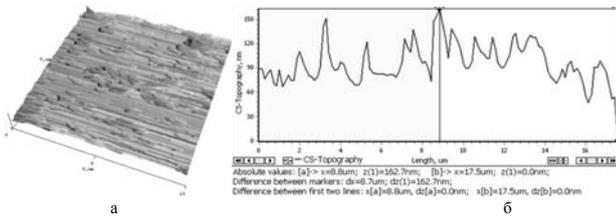


Рисунок 2 – Мікрорельєф ділянки поверхні алмазоподібного покриття (а) та мікропрофіль шару алмазоподібне покриття – основний матеріал (б). Зображення отримано на приладі NT-206V.

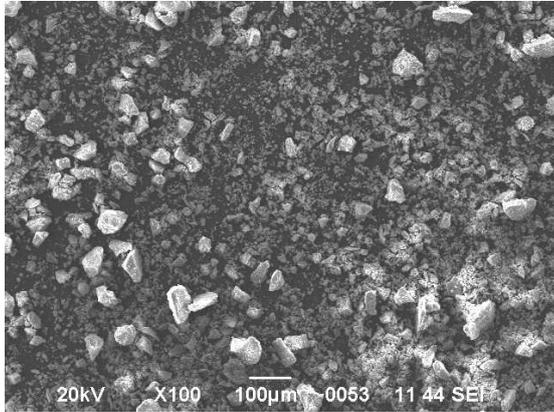


Рисунок 3 – Поверхня зразка зі сформованими на ній алмазними структурами. Формування відбувалося на бінарній структурі Cu-C. Зображення отримано на приладі ZEISS ULTRA-55.

Утворення та зростання таких алмазних структур носило неупорядкований характер. Це підтверджує той факт, що температура не є основним фактором утворення та зростання цих структур, а лише виступає умовою їхнього виникнення на вуглецевому покритті.

17

В той же час, осадження алмазоподібного покриття за температури зразка меншої за 780 К відбувається з утворенням мідно-графітової суміші, яка має адгезійну міцність порядку 16 МПа (адгезійна міцність алмазоподібного покриття Cu-C в середньому становить 46 МПа). Подальше зниження температури зразка до значень менших 550 К в процесі термовакуумного осадження призводить до формування на ньому покриття аморфної фази Cu-C, що перешкоджає утворенню зерен основної фази алмазоподібного покриття (рисунки 4).

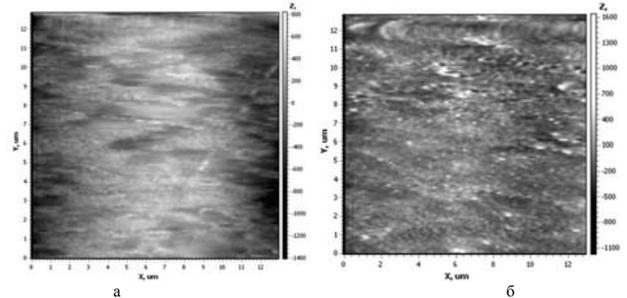


Рисунок 4 – Поверхня зразка зі сформованим на ній аморфним покриттям Cu-C (а) та Cu-C-Cu-C (б). Зображення отримано на приладі NT-206 V.

Як видно із зображення (рисунок 4) поверхні зразків зі сформованим на них покриттям (як за схемою Cu (85%)-C (15%), так і за схемою Cu (50%)-C (15%)-Cu (15%)-C (15%)), при утворенні покриттів за умов докритичних температур не виникають зародки кристалітів, що є основою алмазоподібного покриття, а саме, утворюване таким чином покриття є аморфним, має низьку адгезійну міцність (~6...8 МПа), що не забезпечує усунення мікро- та нанодфектів поверхонь інструменту для прецизійної мікрообробки від дії зовнішніх силових навантажень та вібрацій, що значно погіршує техніко-експлуатаційні характеристики цих виробів.

Висновки і перспективи розвитку. Таким чином, проведені дослідження дозволили встановити особливості формування наноструктурних покриттів алмазоподібних структур в залежності від складу нанесеного на них матеріалу, його геометричних характеристик та хімічної чистоти матеріалу, що доводить їх істотний вплив на формування тонких алмазоподібних наноструктур термічним осадженням у вакуумі.

18

Встановлено, що критична температура зразка на якому формувалося покриття складає 780 К. Вище зазначеної температури утворюється система Cu-C алмазної модифікації, тоді, як при меншій температурі утворюється мідно-графітова суміш. Також встановлено, що при температурі зразка меншій за 550 К формуються аморфні покриття Cu-C, які не забезпечують усунення мікро- та нанодфектів поверхонь від дії зовнішніх силових навантажень та вібрацій.

Отримані результати планується використати для отримання алмазоподібних структур при виготовленні інструментальної бази точного приладобудування, машинобудування, в теплоенергетиці, авіакосмічній техніці.

Список використаної літератури: 1. Верещака, А. С. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями / А. С. Верещака, П. П.Третьяков. – М.: Машиностроение, 1986. – 192 с. 2. Белый А.В., Карпенко Г.Д., Мышкин Н.К. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев. – Москва: Машиностроение, 1991. – 208 с. 3. Самойлович М.И., Белянин А.Ф. Алмазные и алмазоподобные углеродные пленки: формирование и строение // Алмазные пленки и пленки родственных материалов/ Сб. докладов 15-го Междунар. симпозиума «Тонкие пленки в оптике и электронике». – Харьков: НИЦ ХФТИ, «Константа», 2003. – С. 6. 4. Машев Ю.П., Ляшенко Е.П., Шевчук С.Л., Кузнецов А.В. Исследование оптических и фотоэмиссионных свойств алмазоподобных пленок, полученных осаждением из пучков ионов // Алмазные пленки и пленки родственных материалов/ Сб. докладов 12-го Междунар. симпозиума «Тонкие пленки в электронике». – Харьков: НИЦ «Контраст», 2001. – С. 166. 5. Черепанов В.А., Золкин А.С., Колесов Б.А., Мурзахметов К.Т., Семёнов В.И. Алмазоподобные гранулированные пленки на кремнии, полученные при горении ацетилена // <http://www.nsu.ru/cgi-bin/ps?fname=http://src.nsu.ru/win/journals/physstud/articles/paper5.html> (Россия). 6. Суздальцев С.Ю., Яфаров Р.К., Котина Н.М. Кинетика роста и микротопографических измерений параметров и свойств алмазоподобных пленок // Сб. докладов XII междунар. симпозиума «Тонкие пленки в электронике». – Харьков: НИЦ «Контраст», 2001. – С. 153. 7. [Дубровская Г.И.] Котляр А.В., Божко Н.И., Курилко П.И., Бондаренко М.А., Верещанова Е.В. Особенности топографии поверхности тонких оксидных покрытий на стекле после электронно-лучевой обработки // Тезисы докладов XXII Российской конференции по электронной микроскопии ЭМ'2008, 2-6 июня 2008, Черногоровка, С.129. 8. Bondarenko M.A. Study of forming terms thin diamond similar nanostructures thermal vacuum-depositing / M.A.Bondarenko [et al] // Вісник Черкаського державного технологічного університету, Черкаси: ЧДТУ, 2009 (специальний випуск). – С.114-116. 9. Дубровська Г.М., Канашиевич Г.В., Божко Н.І., Бондаренко М.О., Котляр О.В., Руко А.К.М. Приклади застосування фізичних методів дослідження структури поверхні // Під ред. Дубровської Г.М., вид-во Сільхет: Шобуж Біпони, Удоун Офсет Принтерс, 2007. – 248 с.

Поступила в редакцію 12.05.2012

УДК 73, 75

А.И. Бажал, д-р техн. наук, Харьков, Украина, В.М. Кучеровский, канд. техн. наук, А.М. Барак, Москва, Россия, А.А. Бажал, Кривой Рог, Украина, Ант.А. Бажал, Харьков, Украина, С.Г. Серебрянникова, Москва, Россия.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВОЛНОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ОПЫТ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СВОЙСТВАМИ ТВЕРДЫХ СТРУКТУР

В статті приведені основні закономірності розповсюдження хвиль в пористих колекторах і їх вплив на масперенос рідинних середовищ в капілярних структурах. Приведені кількісні оцінки хвильової інтенсифікації капілярного маспереносу. Викладені результати промислового використання хвиль при свердловинному видобутку корисних копалин. Описана фізика процесів, приведені ілюстрації.

В статье приведены основные закономерности распространения волн в пористых коллекторах и их влияние на массперенос текучих сред в капиллярных структурах. Приведены количественные оценки волновой интенсификации капиллярного масспереноса. Изложены результаты промышленного применения волн при скважинной добыче полезных ископаемых. Описана физика процессов, приведены иллюстрации.

The article outlines the main factors of wave transition in porous rocks and the way they influence transition of liquid masses contained in capillary structures of such rocks. Quantitative estimation of wave based intensification of capillary mass transition is made. Outlined result of industrial use of wave in well based extraction of natural reserves. Outlined physical principals of the processes illustrated with examples.

С помощью волн простыми техническими средствами обеспечивается получение очень высоких значений локально сосредоточенного бегущего перепада (градиента) давлений. Несложным оборудованием можно получить перепад от 1 000 до 10 000 атм. [1]

$$P_{\text{волн}} = \rho v,$$

где: $P_{\text{волн}}$ – бегущий перепад (градиент) волнового давления;

a – скорость волны;

ρ – плотность среды – волновода (например, водоносного коллектора);

v – скорость возмущения среды (любой быстротекущий процесс).

С помощью бегущего градиента волнового давления обеспечивается дилатантное трещинообразование в расчетной призабойной зоне коллектора для повышения его абсолютной проницаемости. В основе этого явления лежит образование суперпозиции напряжений, обеспечивающих предельную неравномерность нагружения коллектора, которая обеспечивает дилатантное разуплотнение массива.

19

20

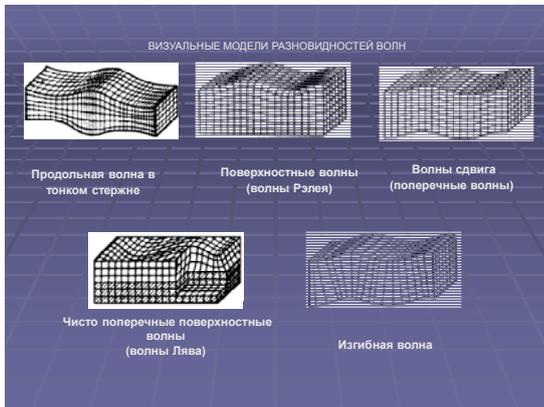


Рисунок 1 – Разновидности волн

По Биоту:

$$\sigma\phi = \sigma_0 - Pp;$$

$$Pp = \lambda \sigma_v ;$$

$$\lambda = 0,82 - 0,9,$$

где: $\sigma\phi$ – фактическое напряжение в массиве в зоне суперпозиции волн и статических нагрузок на месте разуплотнения в прискважинном пространстве;

σ_0 – напряжение в массиве без учета его пористости;

Pp – поровое давление в коллекторе;

σ_v – вертикальное (геостатическое) напряжение в коллекторе;

λ – коэффициент степени влияния жидкости на прочность горной породы.

Изменяя поровое давление в коллекторе, мы создаем совместно с волнами условия для дилатантного порообразования в коллекторе. В процессе дилатансии меняется структура породы (уменьшается ее плотность). Такие процессы всегда предшествуют землетрясениям и по изменению структуры породы прогнозируют землетрясения.



Рисунок 2 – Закономерности дилатантного разуплотнения массива

σ – напряжение сжатия горной породы

ρ – текущее значение плотности сжимаемой породы

ρ_0 – начальное значение плотности сжимаемой породы

ОГ – для монолитной горной породы

ОП – для пористой горной породы

А,В,С,Д,Е,Г,П,Г – точки изменения характера деформаций при неравномерном нагружении

При волновом нагружении коллектора под градиентом волнового давления будет находиться только та часть массива, которая охвачена волной. Это значит, что волновыми силами можно производить локальное повышение проницаемости, которое не будет выходить за пределы самого маломощного пласта [2].

Статический перепад (градиент) давления затухает в коллекторе на длине до 10м по радиусу от скважины. Дальше этого расстояния нет никаких рычагов воздействия на коллектор, кроме волнового бегущего перепада давления (градиента). Бегущий волновой перепад давления (градиент) распространяется по насыщенному коллектору независимо от его проницаемости на любые расчетные расстояния. При этом он осуществляет направленный дискретный массоперенос текучих сред в коллекторе, включая кольматант.

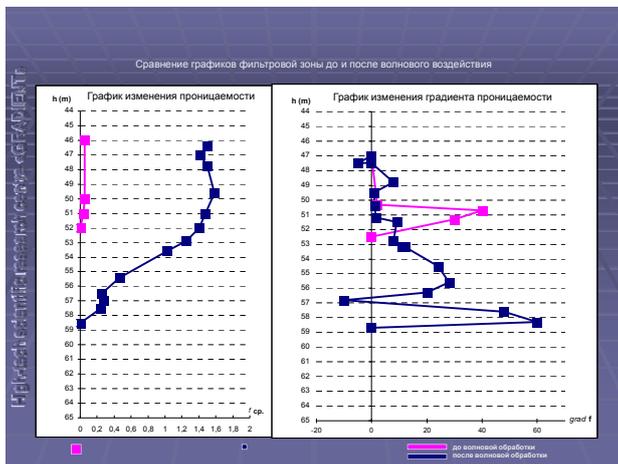


Рисунок 3 – Повышение проницаемости осадочных горных пород при волновом нагружении

Волны активируют жидкие и твердые структуры и позволяют управлять сорбционными и химическими процессами в коллекторе. От этих процессов зависит расколматация коллектора и, как следствие, количество добытой заземленной воды из коллектора. Соответственно коэффициент извлечения воды тоже увеличивается. Традиционно значение коэффициента извлечения нефти составляет 0,1 – 0,15 (до 0,3), воды – до 0,5 на больших глубинах, и до 0,7 – на малых глубинах.

Волны снижают поверхностное межфазное натяжение и уменьшают величину капиллярных сил.

Волны позволяют управлять процессом насыщения пористого коллектора (пропитки) и, таким путем, обеспечивать подвижность заземленных (похороненных) в пористых структурах жидкостей. Величину капиллярного давления определяют по формуле:

$$P = 2 \xi / r, \text{ где:}$$

P – капиллярное давление;

ξ – поверхностное натяжение жидкости;

r – радиус капилляра, например, для воды при $r = 0,01 \text{ мкм} = 10^{-8} \text{ м}$,

$\xi = 8 \cdot 10^{-2} \text{ Вт} \cdot \text{сек} / \text{м}^2$ $P = 160 \text{ атм}$, а при $r = 0,001 \text{ мкм}$, $P = 1600 \text{ атм}$.

Такие градиенты давления технически невозможно создать в скважине, а, значит, и невозможно с помощью статического давления обеспечить капиллярное движение воды в коллекторе. Это будет похороненная (потерянная) вода.

Поры размером 0,01 – 0,001 мкм составляют до (50 – 70)% общего порового объема. Статический перепад давления уменьшается радиально вглубь массива по экспоненте до нуля на глубине до 10 метров.

Таким образом, только бегущий волновой перепад давления позволяет обеспечить критическое насыщение, а значит и подвижность жидкости в капиллярной части коллектора, и, соответственно, повышать извлечение воды из коллектора, а в отработанных коллекторах доизвлекать ещё 30-50% заземленной (похороненной) воды в неподвижном состоянии.

Статический перепад давления на скважине (депрессия) способен обеспечить вектор перепада давления, направленный от скважины вглубь массива. Заземленная жидкость, при этом, будет двигаться от скважины в периферийные области массива. Волновой перепад давления может иметь и противоположное направление и обеспечивать сброс заземленной воды из капиллярной прискважинной зоны коллектора в скважину. Это исключительно эффективно для повышения дебитных характеристик скважин. Дальность действия бегущего волнового градиента давления достигает десятков метров, а в специально сконструированных устройствах она может достигать сотни метров и километров. Интенсивность затухания волны определяется по формуле:

$$PL = POe^{-\alpha L}; \text{ где:}$$

PL – давление в волне на расчетном расстоянии от скважины;

PO – давление в волне в скважине;

α – декремент затухания волны; L – расстояние, на котором измеряется волновое давление.

Волновое давление понижает поверхностное натяжение жидкости и обеспечивает ее десорбцию в порах. Это способствует появлению свободного объема жидкости в порах и снижает величину потребного статического градиента давления, необходимого для передвижения воды в капиллярных коллекторах.

Статический перепад давления действует во все стороны одинаково. Волновое давление действует строго направленно в соответствии с вектором скорости первичного волнового возмущения. Это позволяет решать задачи направленного массопереноса жидкости в коллекторе, и создавать условия для неравномерного нагружения околоскважинного пространства коллектора для обеспечения дополнительного порообразования коллектора в режиме дилатансии.

Таблица – Типовые примеры результатов волновых обработок водяных скважин на Юге России (Волгоградская обл, Ставропольский край, Калмыкия)

№ п/п	Дата обработки скв.	№ скважины, район	Интервал обработки, М	Тип коллектора	Наличие фильтра	Дебит, м3/сут		
						первоначальный	до	после
1	2	3	4	5	6	7	8	9
8	09.94	13А-Выезд	22-30	песчан.	Фильтр	-	10	60
6	10.94	11-Выезд	23-28	песчан.	Фильтр	-	7	16
7	10.94	12-Выезд	23,5-29,5	песчан.	Фильтр	-	3	14
9	11.94	15-Выезд	36,5-38,5	песчан.	Фильтр	-	10	24
4	12.94	7-Выезд	60-73	песчан.	Фильтр	-	5	24
1	02.95	7-Грачи	42,5-43,5	песчан.	Фильтр	12	0	16
14	03.95	5-Урюпинск	54-80	известн.	б/ф	120	0	120
5	04.95	9Б-Выезд	18,1-30	песчан.	Фильтр	-	10	30
3	06.95	18-Грачи	38-44	песчан.	Фильтр	10	7,2	20
20	06.95	1-Алексеевск	20-29	песчан.	Фильтр	нет	7,3	15
21	07.95	2-Алексеевск	22-31	песчан.	Фильтр	-	6	15
22	07.95	3-Алексеевск	24-31	песчан.	Фильтр	-	7	10
23	07.95	4-Алексеевск	30-38	песчан.	Фильтр	-	6	14
24	07.95	5-Алексеевск	20-29	песчан.	Фильтр	-	0	14
2	08.95	13-Грачи	35-51	песчан.	Фильтр	45	45	72
11	11.95	2-Урюпинск	40-76	известн.	б/ф	18	18	70
12	12.95	3-Урюпинск	36-50	известн.	б/ф	18	15	90
13	12.95	4-Урюпинск	45-58	известн.	б/ф	60	15	115
15	01.96	7-Урюпинск	42-50	песчан.	б/ф	100	50	100
19	02.96	20-Елань	166-182	песчан.	Фильтр	16	0	36
18	03.96	19-Елань	172-188	песчан.	Фильтр	16	16	27
26	04.96	8-Ольховская	33-39	песчан.	Фильтр	5	5	23
27	04.96	9-Ольховская	34-39	песчан.	Фильтр	нет	0	25
29	04.96	1-Качалино	35-41	песчан.	Фильтр	4	4	16
10	05.96	4А-Выезд	19-26,4	песчан.	Фильтр	-	10	18
16	05.96	14-Елань	188-200	песчан.	б/ф	10	0	10

25

17	05.96	15-Елань	185-189	песчан.	Фильтр	8	8	36
30	05.96	3/94-Ср.Пруды	115-125	песчан.	Фильтр	2,5	2,5	7
28	06.96	10-Лог	110-120	песчан.	Фильтр	-	0	12
31	06.96	1-Солодча	64-71	песчан.	Фильтр	нет	0	18
25	07.96	2-Ольховская	33-39	песчан.	Фильтр	6	0	18
32	06.97	1-Ставро-Полт.	6-12	песчан.	Фильтр	7	2,7	6,4
34	07.97	3-Ставро-Полт.	6-12	песчан.	Фильтр	9	2,7	9
33	08.97	2-Ставро-Полт.	6-12	песчан.	Фильтр	10	3	12
35	08.97	4-Ставро-Полт.	6-12	песчан.	Фильтр	9	2,3	8,7
36	08.97	5-Ставро-Полт.	6-12	песчан.	Фильтр	12	6	10
37	08.97	6-Ставро-Полт.	6-12	песчан.	Фильтр	12	2	9,58
38	08.97	7-Ставро-Полт.	6-12	песчан.	Фильтр	10	3,5	8
40	09.97	3-Николаевск	38-49	песчан.	Фильтр	75	40	120
39	10.97	1-Николаевск	39-53	песчан.	Фильтр	75	40	120
41	10.97	4-Николаевск	38-49	песчан.	Фильтр	50	25	78
42	10.97	12-Николаевск	38-49	песчан.	Фильтр	40	30	60
43	04.98	Ново-Николаев	110-122	песчан.	Фильтр	10	0	25
44	05.98	1-Фролово	25,4-35,9	песчан.	Фильтр	18	14	24
45	05.98	9Б-Фролово	17-29	песчан.	Фильтр	18	0	29
46	08.98	1-Сурувикино	20-30	песчан.	Фильтр	20	5	30
47	11.98	Н.Чир	190-210	песчан.	б/ф	5	0	10
48	02.99	Н.Чир	190-210	песчан.	б/ф	5	0	10
49	06.99	Ольховка	43-50	песчан.	Фильтр	8	3	15
50	06.99	Ольховка	43-50	песчан.	Фильтр	8	3	15
54	07.99	Дубовка	400-405	песчан.	б/ф	25	0	25
52	08.99	Калмыкия-Элиста	50-60	песчан.	Фильтр	30	16	40
53	08.99	Клетский	40-52	песчан.	Фильтр	8	5	15
51	09.99	Рудня	135-145	песчан.	б/ф	8	5	10

ПРИМЕЧАНИЕ: Всего обработано более 1000 скважин различного назначения

Волновое поле действует с различными силами на частицы многокомпонентной (многофазной) среды, обладающими различным волновым сопротивлением. Поэтому будет иметь место бесконтактное разделение жидкостей и включений, в том числе осаждение взвесей в жидкостях.

Волны генерируются на устье скважины (на поверхности), передаются вдоль скважины по магистральному (жидкостному) волноводу до коллектора,

26

где их отражают и направляют вдоль коллектора. Волны должны иметь расчетные параметры (форму, соответствующую закону сопротивления коллектора нагнетанию жидкой фазы, амплитуду, длину, частоту). Волновод – жидкость в скважине, должен обеспечивать передачу волны в коллектор с минимальными потерями. Передача, поворот и излучение волн в другие среды должны обеспечиваться в соответствии с законами механики волн.

В скважину на устье излучают волны с осевым вектором скорости волнового движения, а на уровне коллектора его поворачивают вдоль продуктивного горизонта.

Например, волна с расчетными параметрами передается на забой скважины глубиной до 3 тысяч метров с потерями по амплитуде волны до 25%.

Выводы:

Волновое воздействие на коллектор обеспечивает условия для повышения водопритока к скважине и, в конечном счете, повышает производительность скважин. Опыт показывает, производительность можно повысить в несколько раз до нескольких десятков раз.

Более сложные технологии, включающие специальные волновые воздействия, позволяют повышать извлечение воды из коллектора, а в отработанных коллекторах доизвлекать еще (30-50)% зашлепленной в мелкопористой части коллектора воды.

Инновационные и модернизированные методы извлечения жидких и газообразных полезных ископаемых с применением силовых волн позволяют сократить затраты на добычу последних в 2-3 раза и довести их извлекаемость до соответствия с начальными запасами.

Список использованных источников: 1.Бажал А.И. и др. Новые проблемы и новые технологии добычи углеводородов на больших глубинах. Высокие технологии в машиностроении, Национальный Технический Университет (ХПИ), 2/2006. 2. Бажал А.И. и др. Природные коллекторы и общие закономерности движения нефти и газа в них. Высокие технологии в машиностроении, Национальный Технический Университет (ХПИ), 2/2009. 3. Бажал А.И. и др. Обеспечение жидкостной проницаемости горных пород на месте их залегания с помощью силовых волн. Высокие технологии в машиностроении, Национальный Технический Университет (ХПИ), 2/2007.

Поступила в редколлегию 22.01.2012

27

УДК 621.91

А.И. Бажал, д-р техн. наук, Харьков, Украина,
В.М. Кучеровский, канд.техн. наук, А.М. Барака, Москва, Россия,
А.А. Бажал, Кривой Рог, Украина, Ант.А. Бажал, Харьков, Украина,
С.Г. Серебренникова, Москва, Россия

ВОЛНЫ И ТЕХНОГЕННАЯ ДИЛАТАНТНАЯ ПРЕНИЦАЕМОСТЬ ТВЕРДЫХ СТРУКТУР

Всі уявлення про зміну фізичного стану - пористості, рідинно-газової проникності масиву монолітних скельних порід та видобутку корисної копалини, пов'язані з подібненням та трициноутворенням гірських порід. Цей процес потребує великих енергетичних та фінансових витрат. Альтернативою цьому процесу є ділатантне розуцільнення масиву. Ділатансія являє собою зсув по кристалічній площині. Це можуть бути площини окремих кристалів або цілих блоків. Зсув по суцільному об'єму, дією суперпозиції імпульсних хвиль при нерівномірному навантаженні забезпечує рівномірну проникність суцільного масиву за рахунок новоутвореної тріщинності та пористості масиву. Равова суперпозиція нерівномірного хвильового поля та багатоциклової імпульсно хвильової активації дислокацій приводить до прискорення дифузії і послідовному підвищенню видобутку корисної копалини. Багатоциклово імпульсно хвильове навантаження з заданим вектором швидкості часток в хвилі і наявності рідкої фази приводить до ділатантних ефектів при значно менших значеннях напруженості в масиві.

Все представления об изменении физического состояния, в том числе пористости, жидкостно-газовой проницаемости массива монолитных скальных пород и извлекаемости полезного ископаемого связываются с дроблением или трещинообразованием горных пород. Процесс этот энергозатратен и затратный. Альтернативой ему является дилатантное разуплотнение массива. Дилатансия представляет собой сдвиг по кристаллическим плоскостям. Это могут быть поверхности отдельных кристаллов или целых блоков. Сдвиг по всему объему, подтвержденному суперпозицией импульсных волн неравномерному нагружению обеспечивает равномерную проницаемость всего массива за счет вновь образованной трещиноватости и пористости массива. Равовая суперпозиция неравномерного волнового поля и многоциклово импульсно-волновой активации дислокаций приводит к ускорению диффузии и последующему повышению извлекаемости полезного ископаемого. Многоциклово импульсно-волновое нагружение с заданным вектором скорости частиц в волне и наличии жидкой фазы приводит к дилатантным эффектам при значительно меньших величинах напряжений в массиве.

All current understanding of methods used in order to establish production of deeply deposited mineral resources from non-permeable and crystalline rocks so to achieve or improve extraction of such resources through wells is associated with destruction and fracturing of such rocks. Known methods of such destruction and fracturing are expensive and require lots of energy. De-latent decompression of rock masses might be viewed as a more usable and inexpensive alternative to such methods. De-latency may be described as a multiple shift within a rock mass along inter-crystal surfaces. These could be surfaces between micro crystals as long as otherwise surfaces of high stress within the rock mass. Volumetric shifts within the mass instigated with superposition of impulse waves and enhanced with unequal stress within the mass provides for establishing volumetric permeability through newly formed micro fractures connecting natural pores of the rock mass. Mono-impulse wave superposition as well as multi-cyclical wave activation leads to enhancement of diffusion processes and in turn to improvement of extraction of such natural resource. Multi-cyclical and calculated impulse wave enhanced technological and volumetric stress with controlled vector of the load and controlled parameters of the waves

28

leads to the de-latent effect, and therefore, establish new permeability and controlled flow within formation.

До настоящего времени все представления об изменении физического состояния, в том числе пористости, жидкостно - газовой проницаемости массива монолитных скальных пород и извлекаемости полезного ископаемого связывались с дроблением или с трещинообразованием горных пород.

Например, для технологических целей извлечения полезного ископаемого методами геотехнологии непроницаемые скальные породы можно подготовить несколькими путями.

Первый, традиционный путь, который в настоящее время повсеместно применяется в технологической практике – это отбойка и дробление руды на свободную поверхность с последующим орошением отбитой горной массы раствором и откачкой раствора при выщелачивании полезного ископаемого. Для полного извлечения полезного ископаемого в этом случае кусок должен иметь размер 20-60 мм, (но не более 100 мм).

Второй путь – не дробить массив, а образовать в нем достаточно густую сетку микротрещин, например, при помощи взрыва. При камуфлетном взрыве образуется сетка трещин в ближней от взрыва зоне (в радиусе 1-2м для скважин диаметром 70-100 мм), которая делит массив на отдельные еще более крупные и неравномерные, чем те, которые получают при дроблении массива.

Трещинообразование происходит только в ближней зоне (1-2м), так как оно возможно только при очень больших напряжениях и в энергетическом отношении по этой причине весьма нецелесообразно (экономнее в энергетическом отношении отбивать и дробить массив на свободную поверхность). Имеются результаты исследований явления *дилатансии** в горных породах под действием одноразового взрывного воздействия, при которых обнаружено увеличение проницаемости массива в ближней от взрыва зоне (на расстоянии 10-15 радиусов заряда), вызванное трещинообразованием [1].

Имеются результаты исследования явления капиллярного эффекта [2], суть которого сводится к увеличению массопереноса через пористые структуры под действием ультразвуковых полей, т.е. знакопеременных волновых полей звуковой амплитуды.

Получены результаты исследований вибрационного воздействия на нефтеносные пласты для повышения их нефтеотдачи, сущность которых состоит в прерывистой подаче с помощью специальных устройств вытесняющей жидкости, т.е. созданию в ней пульсации давления. Пульсация давления создавалась в пределах от звуковых амплитуд до амплитуд величиной 20-30 МПа, причем колебания носили хаотический характер, т.е. целенаправленно не использовалась скорость волнового движения жидкости. Кроме того, амплитуды давлений имели недостаточную величину для эффективного воздействия на скальные породы. Тем не менее, результаты были получены положи-

тельные: эффективность увеличивается на 10-15%, а его продолжительность в 3 раза меньше продолжительности вытеснения нефти без вибрации. Объясняется это тем, что речь во всех случаях шла об уже проницаемых структурах, а вибрации лишь ускорили массоперенос нефти.

Несмотря на перечисленные особенности вибрационного воздействия, на нефтеносные пласты, элементы рассматриваемого эффекта частично могли сказаться на конечных результатах экспериментов. Описанный эффект определяет новый путь управления физико-механическими свойствами горных пород на месте залегания, прежде всего для обеспечения проницаемости массива без его дробления и расчленения трещинами. В его основе лежат явления дилатантного разуплотнения и усталостных эффектов в массиве, происходящих в присутствии жидкой фазы в условиях, как разового высокоамплитудного, так и многоциклового низкоамплитудного неравномерного нагружения массива направленными импульсными волнами, при которых возникают сдвиговые напряжения и давления усталостного характера, сопровождающиеся перемещением и накоплением дефектов кристаллической структуры, порождающими пористость массива.

Дилатансия представляет собой сдвиг массива по кристаллическим плоскостям. Это могут быть плоскости отдельных кристаллов или целых блоков. Сдвиг по всему объему, подтвержденному суперпозицией импульсных волн неравномерному нагружению, а также накопление усталостных явлений при многоцикловогом низкоамплитудном нагружении, обеспечивают равномерную проницаемость всего массива за счет вновь образованной трещиноватости и

пористости массива. Разовая суперпозиция неравномерного волнового поля и многоциклового импульсно-волнового активация дислокаций приводят к ускорению диффузии и последующему повышению извлекаемости полезного ископаемого. Многоциклового импульсно - волнового нагружение с заданным вектором скорости частиц в волне и при наличии жидкой фазы приводит к дилатантным эффектам при значительно меньших величинах напряжений в массиве. Наиболее эффективное дилатантное разуплотнение происходит при создании в одной из плоскостей нагружения растягивающих напряжений, в то время, как в остальных двух плоскостях нагружения имеют место сжимающие напряжения.

Например, в монолитном граните при такой схеме нагружения дилатантное разуплотнение возможно при величине сжимающих напряжений, равных 5,0 МПа [2], в то время как для трещинообразования в сплошном массиве гранита необходимы напряжения 300-500 МПа вблизи свободной поверхности, а на больших глубинах, где сказывается горное давление, в массиве вообще невозможно создать трещины сжимающими напряжениями, если он со всех сторон сжат высокими давлениями.

При импульсно-волновом циклическом увеличении давления поровой жидкости с направлением вектора скорости частиц в волне внутрь массива вдоль напластования горных пород, прочность горных пород резко уменьшается и явления дилатансии в граните возможны при давлениях порядка 1 МПа за счет появления предельной неравномерности нагружения массива в микрообъемах из-за различных величин давлений поровой жидкости в порах различных размеров, расположенных под разными углами к направлению вектора скорости частиц в волне.

Кроме того, участки массива, охваченные импульсной волной, по мере удаления волны от зоны излучения, приобретают все большее поперечное сечение и, соответственно, все меньшее значение амплитуды напряжений, а не сохраняют постоянную позиционную картину нагруженности массива, а именно, за участком массива, охваченным волной сжатия вплотную следует участок с растягивающими напряжениями, что обуславливает условия для реализации дилатантного разуплотнения массива.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что дилатантное разуплотнение в условиях эффектов многоциклового нагружения возможно на расстояниях, в 10-20 (до 100) раз превышающих зону трещиноватости от эпицентра взрыва, так, как для его возникновения нужны напряжения, во много раз меньше по величине. Это вносит принципиально новые представления в науку о добыче полезных ископаемых и о глобальных геопроцессах, которые могут происходить в природных условиях.

Например, расширение добычи полезных ископаемых методами геотехнологии на скальные породы, в том числе монолитные скальные породы без их дробления, позволяет пересмотреть сложившиеся требования к кондиции руд и увеличить их промышленные запасы. Как показали исследования, резко увеличивается извлечение металла с применением описываемых эффектов.

Широкое промышленное применение описываемого явления позволяет решить проблему повышения извлекаемости нефти и газа, а также дегазации угольных массивов с целью исключения выбросов газа при добыче угля.

Физическую сущность эффекта объясняют следующие изученные научной практикой явления.

Дилатантные деформации участка массива, охваченного волной, приводят к пористости массива. С дилатантными деформациями связано некоторое увеличение объема массива, что обычно приводит к остаточным деформациям.

Для обеспечения сдвиговых деформаций необходимо обеспечить неравномерность нагружения массива. Наиболее эффективное дилатантное разуплотнение происходит при создании в одной из плоскостей нагружения растягивающих напряжений. В то время, как в остальных двух плоскостях нагружения имеют место напряжения.

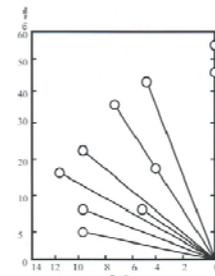


Рисунок 1 – Графические пути нагружения до разрушения (кружки) образцов гранита (начальная пористость 2,64 г/см³)

Ω_1 - максимальное сжимающее напряжение
 Ω_2 - максимальное растягивающее напряжение

На рис. 1 приведены графические зависимости, иллюстрирующие возможности разрушения гранита в условиях неравномерных деформаций [2].

Из графиков видно, что разрушение, трещино- и поробразование можно осуществлять при значениях напряжений сжатия в пределах 1-10 МПа при наличии в одной из плоскостей нагружения растягивающих напряжений.

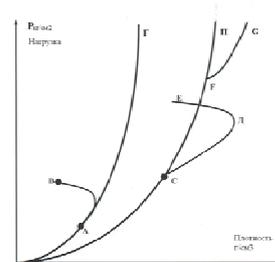


Рисунок 2 – Характерные кривые статического сжатия горных пород: ОГ- для монолитной горной породы; ОП- для пористой горной породы; Р- давление сжатия, кг/см²; ρ_0 , ρ - плотность массива, г/см³.

На рис. 2 приведены характерные кривые сжатия горных пород в условиях неравномерного нагружения [1].

Если сжать образец гранита вдоль ОА, а затем приложить сдвиговое усилие, то вначале сжатие будет происходить и дальше вдоль кривой ОГ, а

затем перейдет в состояние В, несмотря на повышенное давление, т.е. произойдет разуплотнение массива в условиях высоких давлений.

Аналогичное сдвиговое нагружение песчаника вначале приводит к его сжатию (от С к Д), а затем происходит дилатантное разуплотнение (от Д к Е).

Однако в пористых породах, в особенности осадочных при больших давлениях дилатантное разуплотнение не только отсутствует, но и происходит уплотнение массива. Это свидетельствует о строго дифференцированном выборе амплитуд давлений (напряжений) воздействия на массив с целью получения его дилатантного разуплотнения. При несоблюдении этого условия можно получить обратный эффект – снижение проницаемости массива. Исходя из этих соображений, трудно управляемые по величине нагружения взрывные воздействия на массив осадочных пород с целью обеспечения его проницаемости менее предпочтительны в сравнении с методом силовых волн от отдельного генератора. Кроме этого, взрывом трудно практически обеспечить многоцикловый характер нагружения массива и направленное излучение волн с необходимым направлением вектора скорости частиц в волне по отношению к поверхности напластования на каждой глубине залегания горных пород.

Если считать, что справедлив критерий критической энергии деформации по Гриффитсу, то отмеченная выше единственность в поведении горных пород предполагает единственность деформации при заданных среднем давлении и сдвиговом напряжении. Эта гипотеза была проверена на хрупких горных породах. На ее основе построено определяющее соотношение, которое представляет дилатантную деформацию в виде:

$$\varepsilon_{d\text{-exp}} \left[\frac{dP}{A(t)} - A(t) \right]$$

где: $\varepsilon_{d\text{-exp}}$ – относительное изменение деформируемого объема (например, охватываемого волной);

dP – дилатансионное приращение объема, м³;

V – начальный объем, подвергаемый деформации, м³;

dP – приращение среднего давления, МПа;

$A(t)$ – сдвиговое напряжение МПа;

χ, A – функции, зависящие от деформируемого материала.

Дилатантное увеличение объема описывается экспоненциальным законом.

Такая форма записи проста и описывает поведение горных пород через экспериментально измеримые параметры

Инновационный вектор в технологичной добычи полезных ископаемых в этом случае направлен на их скважинную добычу, путем перевода их в раствор на месте залегания, что снижает себестоимость добычи редких, радиоактивных, цветных и драгоценных металлов в 3-5 раз.

Список использованных источников: 1. Михалюк А.В. Горные породы при неравномерных динамических нагрузках. Киев. Наукова думка. 1980, с 154. 2. Ржевский В.В. Бажал А.И. и др. Изменение свойств горных пород в массиве импульсно-волновыми полями при подземном выщелачивании руд. М. Цветметинформация. Выпуск 2, 1985, с.55.

Поступила в редакцию 12.03.2012

СЛОИСТЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ С НАНО-ДИСПЕРСНЫМ ПОКРЫТИЕМ

У цієї статті розглядається розробка шаруватого композиційного матеріалу, що включає твердосплавлений субстрат, керамічний шар і нано-дисперсне багатослойове покриття. Кожен елемент шаруватого інструментального матеріалу виконує індивідуальні функції. Карбідний шар забезпечує підвищену в'язкість і міцність інструментального матеріалу, керамічний шар забезпечує опірність матеріалу окисленню, корозії і високотемпературне зменшення при підвищенні температури, нано-дисперсне багатослойове покриття знижує термо-механічні напруження на передній поверхні інструмента і зменшує поверхневі дефекти кераміки.

В настоящей статье рассматривается разработка слоистого композиционного материала, включающего твердоплавленный субстрат, керамический слой и нано-дисперсное многослойное покрытие. Каждый элемент слоистого инструментального материала выполняет индивидуальные функции. Карбидный слой обеспечивает повышенную вязкость и прочность инструментального материала, керамический слой обеспечивает сопротивляемость материала окислению, коррозии и высокотемпературному разрушению при повышении температуры, нано-дисперсное многослойное покрытие снижает термо-механические напряжения на передней поверхности инструмента и уменьшает поверхностные дефекты керамики.

In the present paper the development of layered composite material build up on a carbide substrate, a ceramic layer and a nano-scale multilayered coating is reviewed. Each element of a layered tool material fulfills individual functions. The carbide layer provides the raised toughness and strength of tool material, the ceramic layer provides resistance of a tool material to oxidation, corrosion and high-temperature weakening at elevated temperatures, the nano-scale multilayered coating decrease of thermal-mechanical stresses on the rake face of the tool and eliminates superficial defects of the ceramic.

Ключевые слова: слоистая композиционная керамика; многослойно-композиционное нано-дисперсионное покрытие; фильтруемое катодное вакуумно-дуговое осаждение; обработка; стойкость инструмента

1. Введение

Одним из ключевых звеньев технологической системы резания является режущий инструмент. В процессе резания инструмент подвергается воздействию высоких термомеханических напряжений, особенно для таких продвинутых процессов как сухое резание, высокоскоростная обработка, резание с большими сечениями среза, резание труднообрабатываемых материалов. Разработка новых высокотехнологичных процессов обработки требует применения адаптированного режущего инструмента.

Основными инструментальными материалами являются: легированные углеродистые стали, быстрорежущие стали, твердые сплавы, сверхтвердые инструментальные материалы (алмазные и из кубического нитрида бора).

Всем группам инструментальных материалов присуща двойственность основных свойств [1-3]. Более твердые и более износостойкие материалы об-

ладают меньшей вязкостью и стабильностью свойств при циклических нагрузках, также как при нестабильных условиях или при прерывистом резании. Материалы, которые лучше сопротивляются различным механическим и термическим нагрузкам часто хуже сопротивляются изнашиванию. Инструментальный материал с идеальными свойствами должен обладать сбалансированным сочетанием высокой твердости и вязкости, иметь химическую инертность относительно материала заготовки и сохранять свойства при повышении температуры. В частности, твердость и вязкость являются противоположными свойствами и в настоящее время не существует инструментального материала, который бы интегрировал все указанные свойства одновременно [1-3]. Для преодоления двойственности противоречий свойств производят различные инструментальные материалы композиционного типа. В частности, все более широкое применение получают инструменты из быстрорежущей стали и твердого сплава с износостойкими покрытиями, а также инструменты с модифицированными поверхностными свойствами [1,2,4-7]. Разработаны слоистые инструментальные материалы, в которых комбинируются слои из вязких и прочных твердых сплавов и высокопрочной и теплоустойчивой керамики [8].

Применение инструментального материала способного сопротивляться термическому разрушению и интенсивному разрушению режущей части инструмента представляется простым решением проблемы [5,8,9]. Таким материалом могла бы стать керамика, комбинирующая при спекании однофазной или многофазной структурами на основе окислов, карбидов или нитридов металла. В отличие от спеченных твердых сплавов, керамика не содержит металлической связки и сохраняет высокую твердость при нагреве до температур выше 1200 °С [8,10,11]. Кроме того керамика из нитрида кремния (Si₃N₄) обладает такими свойствами как: высокая твердость, сопротивляемость окислению, повышенной теплопроводностью и сопротивляемостью «термошоку» [11]. Керамический инструмент способен вести обработку на скоростях резания обычно превышающих 500 м/мин.

Однако применение керамики чрезвычайно ограничено вследствие её низкой прочности и вязкости разрушения в сравнении с твердоплавленным сплавом. В процессе резания, особенно в условиях колебания механических и термических напряжений, наблюдается формирование микротрещин ведущих к микро скалыванию режущей кромки или полному хрупкому разрушению режущей части керамического инструмента [8-11].

В этой связи разработка материала в виде слоистого композита, интегрирующего свойства твердого сплава, керамики и нано-дисперсного покрытия в едином геометрическом теле режущего инструмента является актуальной научной проблемой, рассматриваемой в настоящей статье.

2. Слоистая композиционная керамика с нанодисперсным многослойным покрытием

2.1. Предварительные условия (постановка научных задач)

С учетом тяжелых условий термомеханического нагружения режущей части инструмента для продвинутых технологий обработки была сформулирована концепция инструментального материала со сбалансированным сочетанием основных свойств (рис.1). Такой материал имеет трехслойную архитектуру, включающую слой из твердого сплава (3), слой из керамики (2) и нано-дисперсное покрытие (1). В подобном материале интегрируются свойства всех трех элементов, входящих в его состав. В частности, твердоплавленный субстрат обеспечивает достаточную прочность и вязкость, керамический слой обеспечивает высокую твердость, теплоустойчивость и износостойкость, нанодисперсное многослойное покрытие (НМП) обеспечивает благоприятную трансформацию термо-механических напряжений и залечивает поверхностные дефекты керамического слоя. Разрабатываемый материал получил наименование «слоисто-композиционная керамика» (СКК).

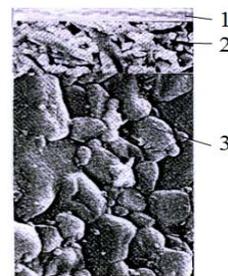


Рисунок 1 – Архитектура слоисто-композиционной керамики (СКК) с нанодисперсным многослойно-композиционным покрытием (НМП): 1 – нано-дисперсное многослойно-композиционное покрытие; 2 – керамический слой; 3 – твердоплавленный субстрат.

Введение НМП в архитектуру СКК обосновывается следующим.

Свойства керамического слоя СКК чрезвычайно чувствительны к поверхностным дефектам, которые формируются в процессе его обработки. В частности при шлифовании и доводке в поверхность керамического слоя формируются дефекты в виде микротрещин, микропор, механических повреждений, остаточных растягивающих напряжений и так далее [8]. Подобные дефекты оказывают сильное негативное влияние на свойства керамического слоя.

Кроме того, керамический режущий инструмент характеризуется высоким уровнем нормальных контактных напряжений на передней поверхности инструмента и концентрацией термических напряжений непосредственно у режущей кромки [8,9,10]. Указанное выше является основной причиной высокой вероятности хрупкого разрушения инструмента из СКК, которое характеризуется микровыкрашиванием режущей кромки или полным хрупким разрушением режущей части инструмента.

Улучшение поверхностных свойств керамического слоя СКК и снижение вероятности хрупкого разрушения инструмента производили путем нанесения покрытия (НМП), формируемого при использовании процесса фильтруемого катодного вакуумно-дугового осаждения (ФКВДО) [4,8,12-14].

При этом достигали следующие эффекты:

- заделывание упомянутых поверхностных дефектов керамического слоя и формирование благоприятных остаточных напряжений сжатия путем ионной бомбардировки в процессе ФКВДО;
- снижение нормальных контактных напряжений и уменьшение концентрации термических напряжений на передней поверхности инструмента путем некоторого роста трения и длины контакта при незначительном увеличении нормального усилия.

Проведение предварительных исследований позволило выбрать следующие составы элементов слоистого композита (см. рис. 1): субстрат 3 на основе твердого сплава WC-TaC-Co с ультрадисперсной структурой; керамический слой 2 на основе сложной композиции (Al_2O_3-AlN or $Al_2O_3-ZrO_2$; or $(Si_3N_4-TiC-Y_2O_3)$); слой 1 на в виде нано размерного многослойного покрытия на основе трехслойной системы Ti-TiN-(TiCrAlN) [5,8].

2.2. Технология изготовления слоисто-композиционной керамики (СКК).

Технология производства ЛСС включала следующие процессы: горячее прессование, гидростатическое уплотнение и газо-статическое доуплотнение материала. Использование указанных технологий позволили успешно решить чрезвычайно трудную научно-техническую проблему соединения таких гетерогенных материалов как "керамика - твердый сплав", "керамика - покрытие", и т.д.

Большое внимание было уделено выбору материалов керамического слоя и твердосплавного субстрата. Такой выбор был достаточно ограничен вследствие необходимости соблюдения требований совместимости теплофизических и механических свойства соединяемых материалов. (коэффициент теплового расширения, модуль упругости, и т.д.). Прочная адгезия между границами слоев являлась одним из главных условий для нормального функционирования инструментов из СКК. При разработке СКК предпочтение отдавали составам слоев 2 и 3 (см. рис.1) формирующих границы с диффузионным слоем [8].

Технологическая схема изготовления СКК включала следующие процессы:

1. Прессование трехкомпонентного порошка из WC, TaC, Co, что обеспечивает получение карбидного слоя толщиной 2,5-3 мм.
 2. Горячее прессование в графитовой прессформе заготовки из Al_2O_3 с добавкой 10 % AlN толщиной 1,5 – 2,0 мм.
 3. Проведение повторного горячего прессования слоистого композита при температуре 1400 °C с выдержкой в течение 5 мин., при давлении 345 Н/мм².
 4. Шлифование пластин из СКК с получением следующих толщин слоев: толщина твердосплавного слоя – 3,5 мм; толщина керамического слоя 1,5 мм.
- Реализация представленной технологии позволила получить партию пластин формы SNUN (стандарт ISO) из СКК, которые были использованы для дальнейших исследований.

2.3. Технология формирования нано-дисперсных многослойно-композиционных покрытий.

Концепцию покрытия, осаждаемого на пластины из керамики, основывали на положениях рассмотренных выше. Осаждаемое покрытие должно максимально уменьшить количество поверхностных дефектов керамики и осуществить благоприятную трансформацию термо-механических напряжений на передней поверхности инструмента [4,5,8]. Необходимо также было решить задачу осаждения покрытия на субстрат с низкой электропроводностью при использовании дугового источника плазмы.

В соответствии с принятыми концептуальными положениями была разработана архитектура нано-дисперсных покрытий, содержащих несколько слоев с индивидуальными функциональными свойствами. Подобное покрытие имеет трехслойную архитектуру и включает адгезионный слой 3, износостойкий слой 1 и переходный слой 2 (Рис.2) [4,5,8].



Рисунок 2 – Концепция архитектуры нано-дисперсного многослойно-композиционного покрытия: 1 – наружный слой с нано-толщинами субслоев (пример TiCrAlN, ZrCrAlN, TiCrAlSiN и т.д.); 2 – промежуточный слой (пример TiN, ZrN, CrN); 3 – адгезионный подслой (пример Ti,Zr,TiN,ZrN); 4 – субстрат (керамика).

Каждый из слоев НМП имеет индивидуальное функциональное предназначение:

- износостойкий слой 1 уменьшает сопротивляемость инструмента окислению и коррозии, снижает физико-химическую активность инструментального материала и адгезию по отношению к обрабатываемому материалу, повышает износостойкость инструмента;
- промежуточный слой 2 поддерживает повышенную адгезию со слоями 1 и 3;
- адгезионный подслой 3 обеспечивает высокую прочность адгезии НМП с керамическим субстратом 4, «залечивает» поверхностные дефекты керамического субстрата.

Синтез нано-дисперсного многослойно-композиционного покрытия (НМП) производили при использовании фильтруемого катодного вакуумно-дугового осаждения (ФКВДО). ФКВДО было использовано как многообещающая технология получения покрытий с хорошей адгезией по отношению к субстрату, высокой плотности и нано-дисперсной структурой, которая способствует повышению режущих свойств инструмента. Процессы ФКВДО были реализованы на экспериментальной установке ВИТ-2 оснащенной следующими устройствами для: фильтрации паро-ионного потока от микрокапельной составляющей испаряемого металла (Ti,Zr,Cr,Al и др.); гашения микродуг; динамического смешивания газов; генерации высоко-энергетических ионов (рис.3).

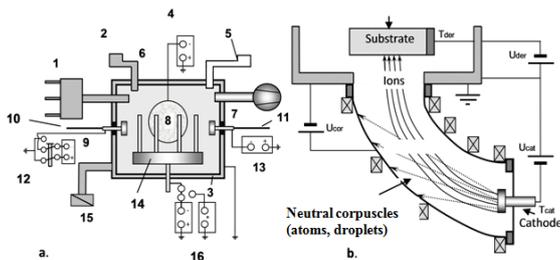


Рисунок 3 – Схема установки ВИТ-2 (а) и устройства для фильтрации паро-ионного потока (б): 1 – смеситель газа; 2 – система подачи газа (нагреватель газа); 3 – корпус установки; 4 – источник энергии для фильтрующего устройства; 5 – система мониторинга температуры; 6 – вакуумная система; 7,9 – стандартные испарители; 8 – система фильтрации паро-ионного потока; 10,11 – интегральные охлаждающие системы для испарителей; 12, 13 – источники энергии для испарителей; 14 – поворотный стол для размещения образцов для нанесения покрытий; 15 – система охлаждения и нагрева камеры установки; 16 – система подачи напряжения в импульсном режиме на объект нанесения покрытий.

Пластинки из СКК перед размещением в камере установки подвергали предварительной химико-механической обработке с целью предварительной подготовки (ультразвуковая очистка, промывка, сушка). В процессе осаждения покрытия пластины из СКК совершали планетарное перемещение в камере установки, что обеспечивало получение покрытий равномерной толщины. Формирование НМП осуществляли при следующих условиях [4,5]:

- производили бомбардировку осаждаемого конденсата металлическими или газовыми ионами (энергии 0,5-1,5 кэВ) с целью перемешивания осаждаемого конденсата и повышения вероятности формирования нано-дисперсных покрытий;
- устанавливали температуру осаждаемого конденсата, уровень которой способствовал повышению степени ионизации паро-ионного потока и предотвращал рост размеров зерен покрытия;
- изменяли скорость перемещения и угловую позицию поверхности субстрата из СКК по отношению к паро-ионному потоку, что способствовало формированию наноразмерных толщин субслоев слоев НМП.

3. Методика экспериментальных исследований

3.1. Оборудование

Объектом исследования служили режущие пластины из СКК с МНП разработанные для сухой обработки, высокоскоростного резания, обработки материалов в твердом виде и резания труднообрабатываемых материалов.

Исследования физико-механических свойств выполняли для режущих пластин со стандартным покрытием, полученным при использовании стандартных arc-PVD технологий и разработанными МНП, осаждаемыми при использовании технологии ФКВДО. Исследовали кристалло-химические свойства при использовании электронно-сканирующего (SEM) микроскопа JSM-6700F с приставкой для дисперсионно-спектральной метрометрии (EMF) JED-2300F компании Jeol. Исследовали также состав и структуру композиции «твердый сплав-керамика», «покрытие-керамика».

Были изготовлены экспериментальные образцы в виде режущих пластин из СКК, соответствующие форме SNUN (стандарт ISO) с радиусом при вершине $r=0,8$ мм. Пластинки были разделены на группы, одну из которых использовали для проведения исследований физико-механических и кристалло-химических свойств, другую – для исследования режущих свойств.

Использовали режущий инструмент с механическим креплением режущих пластин из разработанных СКК с МНП, а также режущими пластинами из стандартных твердых сплавов и керамики со стандартным покрытием и без покрытия. Все пластины имели форму SNUN. Режущий инструмент имел следующие значения параметров режущей части: передний угол $\gamma = -(8-10)^\circ$; задний угол $\alpha = (6-8)^\circ$; угол в плане $\phi = \phi_1 = 45^\circ$; радиус округления режущей кромки $\rho = 15 \mu\text{m}$; размеры фаски $-0,2 \times 45^\circ$.

Исследования проводили при продольном и поперечном точении стали 45 после термообработки (HRC 42-45) и стали 50Г (HRC 58) на универсальном токарном станке 16К20 со скоростью резания $V=80-350$ м/мин; подаче $S=0,1-0,25$ мм/об; глубине резания $t=0,5-0,15$ мм, а также жаропрочного сплава ХН77ТЮК (19-22 % Cr; 2,4-2,8 Ti; 1% Al, $\sigma_b = 930-1080$ МПа) при $v=20-40$ м/мин; $S=0,1-0,15$ мм/rev; $t=0,5-1,0$ мм.

3.2. Результаты исследований и обсуждение.

Результаты сравнительных исследований свойств разработанных СКК с НМП и других инструментальных материалов представлены в таблицах 1-3.

Таблица 1 – Физико-механические свойства пластин из различных инструментальных материалов

Инструментальные материалы	Свойства				Фазовые композиции
	лотность ρ , [g/cm ³]	Микротвердость H^u_{50} , [МПа]	Прочность при изгибе σ_m , [МПа]	Коэффициент стойкости K_{TL}^*	
Керамический слой (2) СКК	3,76	2300-2350	650	1,2**	Al ₂ O ₃ , AlN
Carbide layer (3) of LCC (VK6M)	15,1	1550-1600	1420	0,6**	WC, TaC, Co
LCC with NMC	-	2300	1200-1230	1,7**	-
Mixed ceramic VOK-71	4,5-4,6	2100-2200	700-750	1**	60%Al ₂ O ₃ -40%TiC

$K_{TL}^* = K_{CTL}/K_2$ – коэффициент стойкости при точении стали 45 с $v = 270$ м/мин; $f = 0,2$ мм/rev; $a_p = 0,5$ мм, определяемый как отношение стойкости инструмента с покрытием к стойкости инструмента без покрытия; ** - данные по стойкости инструмента с покрытием получаемым при использовании технологии ФКВДО

Экспериментальные данные по оценке физико-механических свойств показали, что прочность разработанной СКК существенно выше прочности стандартной керамики. Более того, прочность при изгибе образцов СКК с НМП практически не уступает прочности при изгибе образцов из стандартных твердых сплавов ВК6-М (область применения K10-K20 (ISO стандарт).

Износостойкий слой (1) НМП полученный при использовании технологии ФКВДО имеет наноструктуру с размерами зерен порядка 40-60 нм в сравнении с размерами зерен порядка 120-140 нм для стандартных агс-PVD покрытий (см. табл. 2).

Анализ параметров НМП позволяет отметить следующее.

Качество НМП (ФКВДО), разработанных для нанесения на пластины из СКК существенно превосходит качество стандартных агс-PVD покрытий аналогичной композиции. Кроме того, использование разработанной технологии ФКВДО позволяет формировать высококачественную поверхность практически без микрокапель, характерных для стандартной агс-PVD технологии.

Микрокапли являются опасным дефектом стандартных покрытий, поэтому их фильтрация позволяет повысить прочность адгезионной связи, увеличить сопротивляемость СКК окислению и коррозии, повысить износостойкость.

Таблица 2 – Параметры структуры разработанных пластин из СКК с НМП

Материалы	Фазовый состав	Фазовые характеристики				
		Размер зерен, нм	Покрытие h_c и Суб-слой h_d толщина, нм	HV, ГПа	F** Н	ΔP^* , мг/см ²
СКК Субстрат 3 (VK6-M)	86%WC, 8%TaC, 6%Co	1500-2000	-	16,00	-	54,9
СКК Слой керамики 2	90% Al ₂ O ₃ , 10% AlN	500-650	-	-	-	-
Композиция (Ti, Cr, Al)N (Стандартный КИВ)	Ti _{0,25} Cr _{0,25} Al _{0,15} N _{0,35}	120-160	$h_c = 300$	25-36	80-100	14,7
Слой НМП 1 (Ti, Cr, Al)N (Технология ФКВДО)	Ti _{0,25} Cr _{0,25} Al _{0,15} N _{0,35}	40-60	$h_c = 280$ $h_d = 20-25$	31-32	120-130	15,7

ΔP^* -окисление на воздухе при 900 °C в течение 1 часа; F** the critical to the indent at scratch test on coating surfaces (criterion of adhesion)

Результаты сравнительной оценки режущих свойств пластин, изготовленных из различных инструментальных материалов и разработанных СКК с НМП при поперечном точении стали 45 представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Режущие свойства пластин изготовленных из различных инструментальных материалов при поперечном точении стали 45

Режущий материал	Режущие свойства пластины при сухом поперечном точении стали 45 с $v = 420$ м/мин; $S=0,1$ мм/об; $t=0,5$ мм.	
	Стойкость при $VB_{max} = 0,25$ мм, мин	Коэффициент стойкости K_{TL}
BK6-M (86%WC, 8%TaC, 6%Co)	1,22	1
BK6-M – (Ti, Al)N (arc-PVD)	2,8	2,3
VOK-71	2,6	2,13
VOK-71-TiAlN (arc-PVD)	3,2	2,62
СКК	5,3	4,34
СКК с НМП* (FCVAD)	8,0	6,56
СКК с НМП** (FCVAD)	9,6	7,87

*нано-дисперсное покрытие Zr-ZrCrN-CrN; ** нанодисперсное покрытие Ti-TiN-(Ti, Cr, Al)N.

Лучшие режущие свойства при поперечном точении стали 45 с изменяющейся скоростью резания имели пластины из СКК с НМП на основе Ti-TiN-TiCrAlN с $K_{TL}=7,87$ в сравнении с пластинами из стандартной смешанной керамики без покрытия $K_{TL}=2,13$ (VOK-71, mixed Al₂O₃-TiC) и со стандартным покрытием $K_{TL}=2,62$ (VOK-71- TiAlN стандартная технология агс-PVD), а также в сравнении с пластинами из твердого сплава ВК6-М без покрытия $K_{TL}=1,0$ и твердого сплава ВК6-М со стандартным покрытием TiAlN.

Сравнительные результаты испытаний режущих свойств пластин из разработанных СКК с НМП при продольном точении стали 50Г и жаропрочного Ni-сплава ХН77ТЮК представлены на рис.4 и рис.5. Эти результаты также свидетельствуют о более высоких режущих свойствах пластин из СКК с НМП, особенно при резании труднообрабатываемого жаропрочного сплава (см. рис.5)

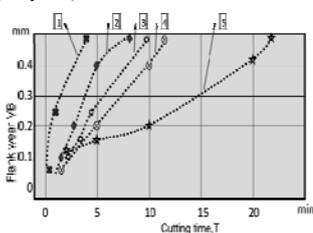


Рисунок 4 – Влияние времени резания T на величину фаски износа задней поверхности h_3 при различных условиях продольного точения стали 50Г (HRC 58) при $V = 340$ м/мин; $S=0,15$ мм/об; $t = 0,15$ мм/об:
1 – ВК6-М; dry machining; 2-ВК6-М – резание с применением рекомендованной смазочной жидкости; 3 – VOK-71, сухое резание; 4 – СКК, сухое резание; 5 – СКК с НМП, экологически дружественное сухое резание.

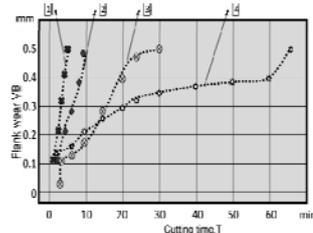


Рисунок 5 – Влияние времени резания T на износ по задней поверхности пластины h_3 при продольном точении Ni-сплава:
1 – ВК6-М, сухое резание;
2 – ВК6-М, резание с рекомендованной смазочной жидкостью;
3 – VOK-71 – сухое резание;
4 - LCC с НМП, экологически дружественное сухое резание.

Анализ механизма изнашивания разработанных СКК с НМП на основе Ti-TiN-TiCrAlN при сухом резании или резании с рекомендованными охлаждающими жидкостями позволяют отметить равномерное изнашивание главной задней поверхности и полное отсутствие микровыкрашиваний режущей кромки или хрупкое разрушение режущей части для всего диапазона исследованных условий резания (табл.3, рис.4 и рис.5). В тоже время для инструмента из стандартной керамики (mixed ceramic VOK-71) с покрытием или без

покрытия отказы инструмента определяются микровыкрашиваниями режущей кромки или полным разрушением режущей части инструмента.

Заключение

Разработана и исследована концепция инструментального материала в форму слоистой композиционной керамики (СКК) с нано-дисперсным многослойно-композиционным покрытием (НМП) для обработки закаленных сталей и труднообрабатываемых Ni-сплавов.

Инструмент из СКК может быть использован для обработки закаленной стали с применением охлаждающей жидкости или для сухой обработки (H10-H20 ISO Standard), а также для обработки труднообрабатываемого жаропрочного Ni-сплава (S10-S29 ISO стандарт). Анализ результатов исследований при обработке закаленных сталей и никелевого сплава инструментом из СКК с НМП позволяет отметить следующее. Стойкость инструмента из СКК с НМП превосходит стойкость твердосплавного инструмента с покрытием и стойкость стандартного инструмента из керамики с покрытием в 2,5-8,0 раз. Разработанные инструменты из СКК с НМП (технология ФКВДО) позволяют увеличить производительность резания в 1,2-1,5 раза не только по сравнению с производительностью резания твердосплавным инструментом с покрытием, но также и в сравнении с производительностью инструмента из стандартной керамики с покрытием.

Список использованной литературы: [1] A.S. Vereschaka. Working capacity of the cutting tool with wear resistant coatings - M: Mashinostroenie, 1993.336 p. (In Russian). [2] G.Byrne, D. Dornfeld, B. Denkena. Advancing Cutting Technology. Annals of the CIRP, 52/2/2003. (In English). [3] W. Konig, F. Klocke. Fertigungsverfahren: Drehen, Fräsen, Boren (Springer, Berlin 2007) (In German). [4] A.S. Vereschaka, A.A. Vereschaka. Methodology for creation of functional coatings for an edge tools. State-of-the-art manufacturing technology. The collector scientific papers. ISBN 978-966-384-059-8. - NTU «KhPI», 2007, pp.192-235. (In Russian). [5] A.S. Vereschaka, A.A. Vereschaka. Functional coatings for an edge cutting tools. Technology of hardening and coatings. 2010. № 6. P. 28-37. (In Russian). [6] Metel Alexander; Grigoriev Sergei; Melnik Yuri et al. Cutting Tools Nitriding in Plasma Produced by a Fast Neutral Molecule Beam // Japanese Journal of Applied Physics. 2011.V 50 No. 8. Page/Article 08JG04 (In English). [7] Metel A.S.; Grigoriev S.N.; Melnik Yu.A.; et al. Glow discharge with electrostatic confinement of electrons in a chamber bombarded by fast electrons // Plasma physics reports. 2011. Vol.37, № 7, pp. 628-637. (In Russian). [8] A.V. Elutin, V.N. Anikin, I.V. Blinkov, A.S. Vereschaka. Methodological principles of creation for high-strength layered ceramics with a coating for high-speed dry cutting. Transaction of the congress «Desain-Technological Information Science 2000». V.1-M.: MSUT STANKIN, 2000, pp.180 - 182. (In Russian). [9] Czechowski K., Pofelska-Filip I., Krolicka B. Effect of miride nano-scale multilayer coatings on functional properties of composite ceramic cutting inserts. Bulletin of Polish Academy of the Science, Technical Sciencs, Vol. 53, No. 4, 2005 (In English). [10] Whitney, T.D., 1994, Ceramic cutting tools – materials, development and performance, Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, U.S.A. (In English). [11] N.N., 2003, Praxis-Report No. 17: “SL 800/SL 550 C: A new generation of uncoated and coated silicon nitride ceramics”, CeramTec AG, Plochingen. (In English). [12] Metel A.S., Grigoriev S.N., Melnik Yu.A., Panin V.V. Filling the vacuum chamber of a technological system with homogeneous plasma using a stationary glow discharge // Plasma Physics Reports. 2010. Vol. 35(12), P. 1058-1067. (In Russian). [13] Sablev L.P., Andreev A.A., Kunchenko V.V., Grigoriev S.N. Vacuum-arc evaporator of metals with an extended planar cathode // Materials Science Forum. 1998. 287-288. P. 323-326. (In Russian) Reports. 2010. Vol. 35(12), P. 1058-1067. [14] Vetter J., Krug T., von der Heide V., AITCrNO coatings for dry cutting deposited by reactive cathodic vacuum arc evaporation. Surface & Coatings Technology 174 –175 (2003) 615–619. (In English). [15] Sselte L. Nanostrukturierte Schichten in der Werkstatt. Plaitig AG. Werkzeugtagung 2002. (In German).

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗАСОБАМИ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Виконано аналіз методів параметричного моделювання при розв'язанні задач технологічної підготовки виробництва. Пропонується в задачах моделювання та прогнозування технологічних параметрів використовувати штучні нейронні мережі. Наведено приклади застосування пакету Matlab, системи NeuroSolutions та створеної системи моделювання для прогнозування технологічних параметрів, що вказують на ефективність та доцільність використання штучних нейронних мереж при розв'язанні технологічних задач.

Выполнен анализ методов параметрического моделирования при решении задач технологической подготовки производства. Предлагается в задачах моделирования и прогнозирования технологических параметров использовать искусственные нейронные сети. Приведены примеры применения пакета Matlab, системы Neurosolutions и созданной системы моделирования, для прогнозирования технологических параметров, которые указывают на эффективность и целесообразность использования искусственных нейронных сетей при решении технологических задач.

The analysis of methods of self-reactance design is executed at the decision of tasks of technological preproduction. It is suggested in the tasks of design and prognostication of technological parameters to utilize artificial neuron networks. The examples of application of package of Matlab, system Neurosolutions and created system of design, are resulted for prognostication of technological parameters which specify on efficiency and expedience of the use of artificial neuron networks at the decision of technological tasks.

Технологічна підготовка приладо- та машинобудівного виробництва характеризується розв'язанням значним різноманіттям складних задач, що вимагають математичного моделювання та прогнозування технологічних параметрів.

При математичному моделюванню технологічних параметрів побудова математичної моделі складного об'єкта можлива на основі застосування методів його декомпозиції на складові взаємопов'язані елементи та отримання математичних моделей цих складових частин. Це дозволяє значно спростити отримання адекватної математичної моделі досліджуваного процесу, а в деяких випадках це є єдиною можливим варіантом вирішення поставленого завдання [1].

Аналіз та порівняльна оцінка застосовуваних методів математичного моделювання, які використовуються при вирішенні технологічних задач, показав, що чисельні методи інтерполяції дозволяють отримати якісні математичні залежності вихідного параметра від однієї змінної, при цьому найкраще наближення до реальної функції дають сплайн-функції.

Методи апроксимації функцій за методом найменших квадратів є ефективним засобом отримання простих математичних залежностей вихідного параметра від однієї або кількох вхідних змінних за відомим видом її струк-

тури, тобто при вирішенні задач ідентифікації. Метод найменших квадратів слід використовувати в якості допоміжних (внутрішніх) процедур при вирішенні завдань багатовимірною математичною моделювання.

Найбільш часто для отримання багатовимірних математичних моделей технологічних параметрів застосовують статистичні методи. Планування експериментів та обробка їх результатів методом регресійного аналізу дозволяє досить просто отримати лінійну математичну залежність, а в деяких випадках – нелінійну модель. Але це вимагає значних експериментальних досліджень і, відповідно, значних витрат коштів і часу. Значно зменшити кількість експериментів і, відповідно, витрати часу і коштів при їх реалізації можна шляхом застосування методів теорії подібності та аналізу розмірностей.

Новим, ефективним методом отримання математичних моделей є нечіткий метод групового врахування аргументів (МГВА), який має всі переваги класичного МГВА і разом з тим позбавлений його недоліку – він дозволяє отримати значення прогнозованих вихідних параметрів не в окремій точці, а в певному довірчому інтервалі [2].

В останні десятиліття бурхливо розвивається нова прикладна область математики, що спеціалізується на штучних нейронних мережах (ШНМ). Актуальність досліджень в цьому напрямку підтверджується розмаїттям різних застосувань ШНМ. Це автоматизація процесів розпізнавання образів, адаптивне управління, апроксимація, прогнозування, створення експертних систем, організація асоціативної пам'яті і багато інших можливостей використання.

Широке коло задач, що вирішуються ШНМ, не дозволяє в даний час створювати універсальні, могутні мережі, змушуючи розробляти спеціалізовані ШНМ, що функціонують за різними алгоритмами.

Метою роботи є обґрунтування доцільності та визначення ефективності використання штучних нейронних мереж при параметричному моделюванні, розроблення методики цього моделювання, створення відповідних алгоритмів та програм, а також практична апробація методик нейромережевого моделювання при розв'язанні технологічних задач.

Основний матеріал досліджень. Моделі ШНМ можуть бути програмного і апаратного виконання. В роботі розглядається програмна реалізація нейронних мереж.

Найбільш доцільним є використання ШНМ в задачах технологічної підготовки виробництва з метою прогнозування та моделювання параметрів, класифікації, групування та розпізнавання образів тощо [3].

Виконано аналіз пакетів програм, що реалізують штучні нейронні мережі. Він показав, що значну гнучкість та функціональність має пакет MatLab. Завдяки достатньо широкому набору архітектур ШНМ та видів їх навчання він дозволяє як будувати нейронні мережі з довільною архітектурою, так і використовувати широкий спектр цих архітектур, що представлені функціями програмного пакету, та встановлювати метод їх навчання, які дають можливість вирішувати широке коло задач.

З метою визначення ефективності використання ШНМ, що створені засобами модуля Neural Network Toolbox пакету MatLab для прогнозування технологічних параметрів, проведено експериментальні дослідження процесу токарної обробки сталі 20 прохідним різцем із вольфрамового твердого сплаву ВК8. При проведенні експерименту оброблювались заготовки діаметром від 22,2 до 26,6 мм, з глибиною різання t , що варіювалась в межах від 0,25 до 0,5 мм. Частота обертання деталі n змінювалась в межах від 400 до 630 об/хв, а подача s – в межах 0,07–0,225 мм/об. При цьому вимірювали складові сили різання P_x , P_y , P_z та шорсткість обробленої поверхні.

Для розв'язання задачі прогнозування параметрів процесу токарної обробки за даними вибрана штучна нейронна мережа прямого розповсюдження. Навчання ШНМ здійснювалося згідно з алгоритмом зворотного розповсюдження похибки Левенберга-Марквардта. Для цієї мережі та алгоритмів навчання створені програми прогнозування вихідних параметрів процесу точіння.

В якості прикладу, який демонструє роботу ШНМ, визначали шорсткість обробленої поверхні й порівнювали отримані значення з експериментальними даними, значення яких наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняльні значення шорсткості обробленої поверхні, що отримані експериментальним шляхом та за допомогою налаштованих нейронних мереж.

№ досліду	Швидкість різання V , м/хв	Подача s , мм/хв	Глибина різання t , мм	Час обробки τ , хв	Експериментальні значення шорсткості R_z	Прогнозовані значення шорсткості R_z
1	52,6	45	0,35	3,38	10	11,3
2	50,44	90	0,5	5,06	22	20,5
3	39,25	90	0,25	6,74	30	34,2
4	38,3	55	0,4	9,56	20	18,7

Порівняння значень прогнозування шорсткості обробленої поверхні за допомогою налаштованої штучної нейронної мережі та відповідних експериментальних даних показало, що похибка прогнозування знаходиться в межах 7–15%.

Програмний пакет MatLab також дозволяє реалізувати власні алгоритми навчання нейронних мереж. Це дає можливість задовольнити особливості розв'язання будь-якої задачі, але потребує досконалих знань математичних алгоритмів навчання та внутрішньої мови пакету MatLab.

Окрім пакету MatLab, серед стандартних програмних систем створення, навчання та використання наявних нейронних мереж для прогнозування, моделювання, класифікації, групування та розпізнавання образів треба виділити

систему NeuroSolutions, що має широкий набір різноманітних структур штучних нейронних мереж, надає рекомендації з їх використання, має зручний інтерфейс користувача та дозволяє отримати текст програми на одній із мов програмування, що реалізує налаштувану штучну нейронну мережу.

Система увірнула в собі найкращі досягнення в області використання штучних нейронних мереж. Графічний інтерфейс користувача системи забезпечує досить потужне та гнучке середовище для створення та реалізації ШНМ. Його інтуїтивність перевищує інтерфейси інших подібних систем, а також він надає можливість швидко та легко будувати різноманітні ШНМ.

Як приклад використання системи NeuroSolutions для прогнозування складових сил різання процесу обробки матеріалів різанням використано експериментальні дані, що отримані при токарній обробці заготовки із сталі 40Х різцями з твердосплавною пластиною ВК8 з різними видами покриття різальної крайки (без покриття, з дискретним покриттям TiN, з суцільним покриттям TiN, з суцільним покриттям TiAlN, з дискретним покриттям TiAlN та з дискретним покриттям TiC).

Згідно з методикою використання системи NeuroSolutions спочатку задаються дані для роботи нейронної мережі – матриця вхідних даних мережі та стовпчики вихідної інформації. Після цього вся сукупність дослідів поділяється на три частини: дані для тренування мережі, дані для відновлення та дані для тестування. На основі введених даних вибирається штучна нейронна мережа із множини наявних в системі, яка найбільш точно моделює досліджуваний процес.

Для отриманих експериментальних даних найбільш ефективною для прогнозування визначена штучна нейронна мережа моделі RBF, яка реалізує нелінійні ШНМ та містить єдиний (окремий) прихований шар обробки елементів. Цей шар використовує гаусовські активувальні функції, а не звичайні сигмоїдні. Ці мережі мають тенденцію навчатися набагато швидше, ніж інші подібні мережі. Загальний вигляд мережі наведено на рис. 1.

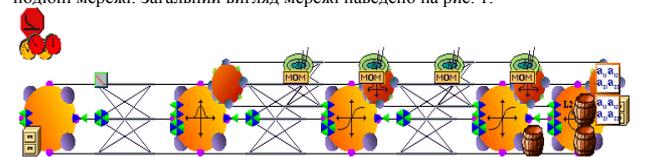


Рисунок 1 – Схема штучної нейронної мережі моделі RBF, що моделює досліджуваний процес.

В таблиці 2 наведено порівняльні значення складових сил різання експериментальних та прогнозованих, що отримані за допомогою налаштованої мережі. Аналіз отриманих результатів показує, що розходження реальних та прогнозованих значень не перевищує 8%.

Система NeuroSolutions дозволяє отримати текст програми на одній із алгоритмічних мов (наприклад, C++), що моделює досліджуваний процес за допомогою налаштованої штучної мережі.

Нараді з пакетом MatLab та системою NeuroSolutions, що реалізують штучні нейронні мережі, створена система нейромережевого моделювання, яка представлена на мові Delphi 7. При створенні цієї системи використано безкоштовний компонент NeuralBase та бібліотека компонентів, що призначена для програмної реалізації нейронних мереж. В середовищі програмування Delphi виконано опис та розміщення компонентів, після чого здійснено компіляцію коду [4].

Таблиця 2 – Порівняльні значення вихідних величин, що отримані в результаті проведеного експерименту, та їх прогнозовані значення.

№ досліді	Експериментальні значення			Прогнозовані значення		
	P_x, H	P_y, H	P_z, H	P_x, H	P_y, H	P_z, H
1	183,9	136,7	151,3	186,6	144,1	156,9
2	262,6	280,9	145,7	255,2	283,6	141,2
3	1023,2	432,4	375,9	1011,5	437,9	368,7
4	101,8	81,3	67,3	98,3	85,7	62,4
5	223,7	251,3	131,7	219,1	257,4	136,2
6	246,4	70,2	205,5	240,3	66,8	211,6
7	166,0	133,0	128,1	161,7	138,8	123,5
8	211,0	299,3	96,5	218,6	291,1	100,2
9	823,1	291,9	111,6	813,6	284,8	103,0
10	89,1	85,0	136,7	94,4	82,3	129,9
11	119,3	81,3	205,5	121,5	86,7	211,6
12	95,2	177,4	145,2	93,9	174,0	152,6
13	71,6	73,9	113,6	77,2	78,1	120,3
14	66,8	70,2	119,6	71,4	77,8	113,2
15	38,9	33,3	140,7	41,2	35,7	144,8
16	71,2	129,3	127,1	66,5	137,2	123,6
17	58,1	118,3	78,9	53,6	122,9	82,0
18	327,2	85,0	93,0	318,4	82,6	97,3

На рис. 2 наведено інтерфейсні вікна системи моделювання, що реалізує штучні нейронні мережі. Тут на рис.2а надано вікно вибору джерела початкових даних для навчання штучної нейронної мережі, на рис. 2б – вікно вибору файлу, де записано початковий масив, на рис. 2в – вікно вибору вхідних та вихідних параметрів для навчання мережі, на рис.2г – вікно завдання параметрів штучної нейронної мережі, на рис. 2д – вікно з результатами навчання мережі, на рис. 2д – вікно введення початкових даних для прогнозування технологічних параметрів за допомогою налаштованої нейронної мережі.

Перевірка якості прогнозування технологічних параметрів за допомогою запропонованої системи моделювання проведено експериментальні дослідження процесу токарної обробки заготовки $d = 36$ мм із сталі 3 ГОСТ 380-88 різцем з твердосплавною пластиною T15K6, різальна крайка якої мала такі значення: задній кут $\alpha = 10^\circ$; передній кут $\gamma = 10^\circ$; головний кут в плані $\phi = 45^\circ$; допоміжний кут в плані $\phi_1 = 45^\circ$. В процесі проведення експериментів швидкість різання V варіювалась в діапазоні від 30 до 128 м/хв. Подача s змінювалась в діапазоні від 0,11 до 0,44 мм/об. Глибина різання t була сталою і становила 1 мм. В ході експериментальних досліджень вимірювалась шорсткість обробленої поверхні Ra профілометром Mahr PS1.

Для моделювання процесу токарної обробки ШНМ представлена багатошаровим перцептроном з трьома прихованими шарами та трьома вхідними нейронами – сенсорами. При цьому перший прихований шар налічував шістьнадцять нейронів, другий – вісім, третій – чотири.

В таблиці 4 наведено порівняльні значення шорсткості обробленої поверхні, що отримані в результаті проведених експериментальних досліджень та прогнозування за допомогою налаштованої ШНМ.

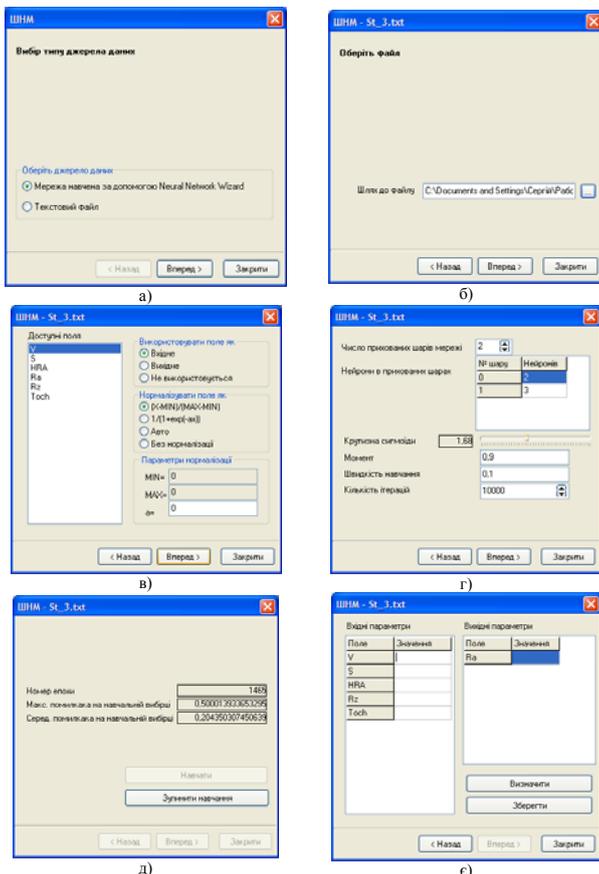
Таблиця 4 – Порівняльні значення шорсткості обробленої поверхні, що отримані в ході експериментальних досліджень та прогнозування за допомогою налаштованої ШНМ.

п/п	V, м/хв	s, мм/об	Ra (експер.), мкм	Ra (прогн.), мкм	Похибка, %
1	30	0,44	21,52	20,798	4
2	60	0,36	8,3	8,688	4,5
3	96	0,22	5,081	4,859	4,4
4	120	0,11	1,846	1,923	4,1

В [5] наведено особливості та інші приклади використання штучних нейронних мереж для розв'язання технологічних задач.

Висновки і перспективи розвитку. Створені алгоритм і програми навчання та тренування нейронних мереж за допомогою пакету MatLab дозволяють ефективно розв'язати задачі прогнозування технологічних параметрів і класифікації технологічних об'єктів за результатами фізичного експерименту.

Аналіз експериментальних даних показав, що для прогнозування технологічних параметрів є ефективним використання мереж прямого розповсюдження з алгоритмами навчання зворотного розповсюдження, зокрема алгоритму Левенберга-Маркардта, а для класифікації – доцільно використовувати імовірнісні ШНМ. Ці мережі показали кращу збіжність при порівнянні їх з іншими архітектурами мереж та методами навчання.



Рисунки 2 – Інтерфейсні вікна системи моделювання

Наведені приклади використання системи NeuroSolutions для моделювання досліджуваного процесу, прогнозування технологічних параметрів та розв'язання інших задач дозволяє вибрати найбільш ефективну структуру нейронної мережі та встановити параметри її навчання з метою отримання необхідних результатів з заданою точністю, а також отримати текст програми, яка моделює роботу досліджуваного процесу за допомогою налаштованої ШНМ.

Обробка експериментальних даних за допомогою розроблених програм дозволила налаштувати мережі на прогнозування таких параметрів обробки деталей, як шорсткість обробленої деталі, складові сили різання, розмірний знос інструменту, а також на класифікацію матеріалів за їх хімічним складом. Отримані результати дають можливість зробити висновки щодо доцільності використання ШНМ для прогнозування та класифікації технологічних параметрів.

Сумісне використання методів штучних нейронних мереж та економіко-статистичних методів дозволяє організувати комп'ютерний експеримент, який дає можливість в значній мірі зменшити матеріальні, енергетичні та часові витрати при проведенні експериментальних досліджень, реалізувати сучасні інформаційні технології в технологічній підготовці виробництва та є необхідною умовою впровадження CALS – технологій в приладо- та машинобудуванні.

Список використаної літератури: 1. Антонок В.С., Вислоух С.П. Информационные технологии при технологической подготовке производства // Процессы механической обработки в машиностроении. – Выпуск № 6. – 2009. – С. 3–16. 2. Вислоух С.П., Катрук О.В. Моделирование технологических параметров нечётким методом группового взвешивания аргументов // Вісник Хмельницького національного університету / Технічні науки. – Хмельницький, 2007. – № 1 (89). – С. 169–172. 3. Вислоух С.П. Нейросетевое моделирование технологических параметров процесса резания // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн.-техн. сборник. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2005 – Вып. 68. – С. 109–116. 4. Савайок С.П., Вислоух С.П. Штучні нейронні мережі в системах технологічної підготовки виробництва // Матеріали X міжнародної науково-технічної конференції «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів». – Кременчук: КрНУ ім. М.Остроградського, 2011. – С.157-158. 5. Вислоух С.П. Інформаційні технології в задачах технологічної підготовки приладо- та машинобудівного виробництва: Монографія / С.П. Вислоух. – К.: НТУУ „КПІ”, 2011. – 480 с.

Поступила в редакцію 18.05.2012

РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ СРОКА ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОЕКТОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ SLA И SLS

У статті розглянуто питання статистичного прогнозування при аналізі тимчасових ланцюгів повного циклу виготовлення виробів генеративними технологіями макрорівня. Наведено рекомендації по визначенню строку виконання проектів виготовлення виробів з використанням технологій лазерної стереолітографії (SLA) і селективного лазерного спекання (SLS).

В статті розглянуто питання статистичного прогнозування при аналізі часових ланцюгів повного циклу виготовлення виробів генеративними технологіями макрорівня. Наведено рекомендації по визначенню строку виконання проектів виготовлення виробів з використанням технологій лазерної стереолітографії (SLA) і селективного лазерного спекання (SLS).

In article questions of statistical forecasting are considered at the analysis of time chains of a full cycle of manufacturing of products by generative technologies of macrolevel. Recommendations about definition of performance term of manufacturing projects of products with use of technologies of laser stereolithograph (SLA) and selective laser sintering (SLS) are resulted.

Обобщенная модель времени полного цикла изготовления изделий генеративными технологиями макроуровня

Полный цикл создания изделий ТΣ (TSigma) генеративными технологиями макроуровня можно представить в виде линейной последовательности периодов:

$$T_{\Sigma} = T_{3Dmod} + T_{Form} + T_{PP1} + T_{PP2} + T_{PP3},$$

где T_{3Dmod} - время создания электронных 3D моделей изделий;

T_{Form} - время формообразования изделий (непосредственно на установке послыного выращивания);

$T_{PP1}, T_{PP2}, T_{PP3}$ - времена различных этапов постобработки.

Применительно к технологиям лазерной стереолитографии (SLA) и избирательного лазерного спекания (SLS) могут использоваться следующие постпроцессы:

T_{PP1} - постпроцесс № 1: SLA - окончательная фотополимеризация изделия в специальной ультрафиолетовой камере мод. PCA 500; SLS - очистка изделий от остаточного порошка;

T_{PP2} - постпроцесс № 2: SLA - выдержка изделия в специальном низкотемпературном термощафе (для повышения температуры плавления полимера); SLS - выжигание полимера, спекание основного материала

ла и инфильтрация оловянистой бронзы при использовании инкапсулированных в полимер частиц металлических порошков (неражавеющая или углеродистая сталь);

T_{PP3} - постпроцесс № 3 (слесарная шлифовка, полировка, окраска и пр.).

В каждом периоде имеет место процедура эволюции изделия и на каждом ее этапе достигается определенный эволюционный результат: T_{3Dmod} - файл (или система файлов) триангуляционного описания 3D моделей изделий (в STL-формате); T_{Form} - послыная материализация 3D моделей, т. е. прямой переход от электронного образа изделия в твердотельное состояние; $T_{PP1}, T_{PP2}, T_{PP3}$ - придание изделиям требуемых эксплуатационных свойств и необходимого потребительского качества.

Полный цикл создания изделий интегрированными генеративными технологиями макроуровня состоит из ряда закономерно расположенных и находящихся во взаимосвязи периодов (звеньев), представляющих временную цепь. Понятие временных цепей по аналогии с размерными цепями при решении технологических задач введено Б.М. Базровым [3].

Основной особенностью временных цепей создания изделий интегрированными генеративными технологиями макроуровня является высокий уровень неопределенности значений составляющих звеньев. Это связано с большим числом факторов, влияние которых практически учесть не представляется возможным. Таким образом, попытки использования только детерминированного подхода обречены на неудачу. Одним из перспективных современных подходов к решению задач при системной неопределенности исходных данных является использование нечетких экспертных оценок на базе интервальных, треугольных, трапециевидных и др. чисел [2, 8, 9, 10].

В настоящей работе расчет временных цепей производился методом статистического прогнозирования [1, 5, 6, 7]. Предлагаемый метод объединяет в себе возможности как полной, так и неполной взаимозаменяемости с оценкой достоверной вероятности нахождения значений замыкающего звена в заданном интервале или риска выхода за его границы.

При прогнозировании использовались обобщенные модели полного цикла изготовления изделий [4] и технологического времени генеративных технологий макроуровня [11].

Практическая реализация статистического прогнозирования времени полного цикла изготовления изделий должна выполняться, как правило, не по часам, а по календарным дням. Для реализации такой возможности в пользовательскую функцию определения времени полного цикла изготовления изделий необходимо ввести продолжительность рабочего дня для каждого из звеньев временной цепи. Для этого в процедурной модели были введены следующие коэффициенты: $KhT3Dmod$ - время создания электронных 3D моделей изделий ($KhT3Dmod = 8$ час.); $KhTForm$ - время формообразования изделий (непосредственно на установке послыного выращивания,

$KhTForm = 24$ час.); $KhTPP1, KhTPP2, KhTPP3$ - продолжительность постпроцессов соответствовала 8 час.

Приведенные значения коэффициентов отражают структуру работ, сложившуюся в ЧАО "Конструкторско-технологическое бюро верификационного моделирования и подготовки производства" при кафедре "Интегрированные технологии машиностроения" им. М.Ф. Семко НТУ "Харьковский политехнический институт" (могут при необходимости изменяться).

Статистическое прогнозирование времени полного цикла изготовления изделий в системе моделирования рабочих процессов интегрированных технологий обеспечивалось вариантом расчетов с определением набора абсолютных и относительных характеристик (вариант расчетов соответствует значению субпараметра в процедурной модели $nSub = 5$): $TSigmaDay$ - время полного цикла, дн.; $TForm$ - общее время формообразования на установке, час; $TForm / KhTForm / TSigmaDay$ - относительное общее время формообразования на установке; $T3Dmod / KhT3Dmod / TSigmaDay$ - относительное время создания электронных 3D моделей изделий; $TPP1 / KhTPP1 / TSigmaDay$ - относительная продолжительность постпроцесса № 1; $TPP2 / KhTPP2 / TSigmaDay$ - относительная продолжительность постпроцесса № 2; $TPP3 / KhTPP3 / TSigmaDay$ - относительная продолжительность постпроцесса № 3.

Примеры использования разработанной методологии статистического прогнозирования при анализе временных цепей полного цикла изготовления изделий при единичных заказах представлены ниже. К ним относятся по одному примеру использования лазерной стереолитографии (SLA) и селективного лазерного спекания (SLS).

Рекомендации по определению срока выполнения проектов изготовления изделий с использованием технологии SLA

Рассмотрим на примере корпуса видеомодуля по заказу ООО «Экта-Лиметед» (г. Житомир). Данная фирма занимается проектированием и изготовлением крупногабаритных видеопанно.

При прогнозировании полного цикла изготовления корпуса видеомодуля параметры имели следующие типы и значения, представленные в табл. 1.

Результаты статистического прогнозирования полного цикла создания изделий представлены на рис. 1. Полный цикл создания изделий для заданных условий расчета находится в исходном интервале значений 3.87÷8.21 дн. и имеет среднеарифметическое значение 5.798 дн. Установка нового доверительного интервала показывает, что интервал исследуемого

Таблица 1 - Параметры при прогнозировании полного цикла изготовления корпуса видеомодуля (SLA)

Об.	Типы и значения параметров
T_{3Dmod}	время создания электронных 3D моделей изделий - стохастический нечеткий параметр Par1: распределение $Triang(x, X_{min} = 1.600 E1, X_{mod} = 1.800 E1, X_{max} = 3.200 E1)$
T_{PP1}	продолжительность постпроцесса № 1 - стохастический нечеткий параметр Par3: распределение $Trapez(x, X_{min} = 1.000 E0, X_{mod1} = 2.000 E0, X_{mod2} = 4.000 E0, X_{max} = 5.000 E0)$
T_{PP2}	продолжительность постпроцесса № 2 - детерминированный параметр Par4: значение 0.000 E0
T_{PP3}	продолжительность постпроцесса № 3 - стохастический нечеткий параметр Par5: распределение $Rand(x, X_{min} = 9.000 E0, X_{max} = 2.400 E1)$
T_{Home}	подготовительные операции - стохастический параметр Par6: распределение $Rand(x, X_{min} = 1.000 E1, X_{max} = 0.200 E0)$
T_{End}	заключительные операции - стохастический параметр Par7: распределение $Rand(x, X_{min} = 1.000 E1, X_{max} = 0.200 E0)$
Y_A	ширина рабочей области, занимаемой изделиями по оси Y - детерминированный параметр Par8: значение 3.500 E2
H_Z	высота рабочей области, занимаемой изделиями по оси Z - детерминированный параметр Par9: значение 7.000 E1
S_A	площадь рабочей области, занимаемой изделиями - детерминированный параметр Par10: значение 1.575 E5
K_{Σ}	вероятностный коэффициент заполнения рабочей области изделиями - стохастический параметр Par11: распределение $Rand(x, X_{min} = 0.500 E1, X_{max} = 0.200 E0)$
K_Y	вероятностный коэффициент размера сечения по оси Y - стохастический параметр Par12: распределение $Rand(x, X_{min} = 0.600 E0, X_{max} = 0.700 E0)$
D_L	диаметр пятна лазерного луча - стохастический параметр Par13: распределение $Rand(x, X_{min} = 0.230 E0, X_{max} = 0.270 E0)$
V_L	скорость луча лазера - стохастический параметр Par14: распределение $Rand(x, X_{min} = 3.000 E3, X_{max} = 5.000 E3)$
h_C	толщина формируемого единичного слоя - детерминированный параметр Par15: значение 0.150 E0

продолжение табл. 1

Об.	Типы и значения параметров
K_{WR}	коэффициент проходов луча при построении изделий - стохастический параметр Par16: распределение $Rand(x, X_{min} = 2.000 E0, X_{max} = 2.000 E0)$
H_d	высота (по координате Z) дополнительных технологических элементов - стохастический параметр Par17: распределение $Rand(x, X_{min} = 8.000 E0, X_{max} = 9.000 E0)$
K_{LB}	коэффициент заполнения дополнительных технологических элементов - стохастический параметр Par18: распределение $Rand(x, X_{min} = 0.300 E0, X_{max} = 0.500 E0)$
K_{LR}	коэффициент проходов луча при построении дополнительных технологических элементов - детерминированный параметр Par19: значение 1.000 E0
h_{WP}	глубина дополнительного опускания платформы при построении изделий - стохастический нечеткий параметр Par20: распределение $Triang(x, X_{min} = 1.000 E2, X_{mod} = 0.150 E0, X_{max} = 0.200 E0)$
h_{AP}	глубина дополнительного опускания при построении технологических элементов - стохастический параметр Par21: распределение $Rand(x, X_{min} = 8.000 E0, X_{max} = 1.000 E1)$
V_p	скорость опускания рабочей платформы - стохастический нечеткий параметр Par22: распределение $Triang(x, X_{min} = 1.000 E0, X_{mod} = 2.000 E0, X_{max} = 3.000 E0)$
L_C	длина подвода-перебега выравнивающего элемента установки - стохастический нечеткий параметр Par23: распределение $TriangRight(x, X_{min} = 5.000 E0, X_{max} = 7.000 E0)$
V_C	скорость перемещения выравнивающего элемента установки - стохастический нечеткий параметр Par24: распределение $TriangLeft(x, X_{min} = 1.200 E1, X_{max} = 1.500 E1)$
K_{WC}	коэффициент числа проходов выравнивающего элемента установки при построении изделий - стохастический нечеткий параметр Par25: распределение $TriangLeft(x, X_{min} = 1.000 E0, X_{max} = 2.000 E0)$
T_{WD}	время выдержки при построении изделий - стохастический нечеткий параметр Par26: распределение $Triang(x, X_{min} = 1.000 E1, X_{mod} = 1.200 E1, X_{max} = 1.500 E1)$
T_{AD}	время выдержки при построении технологических элементов - стохастический нечеткий параметр Par27: распределение $Triang(x,$

57

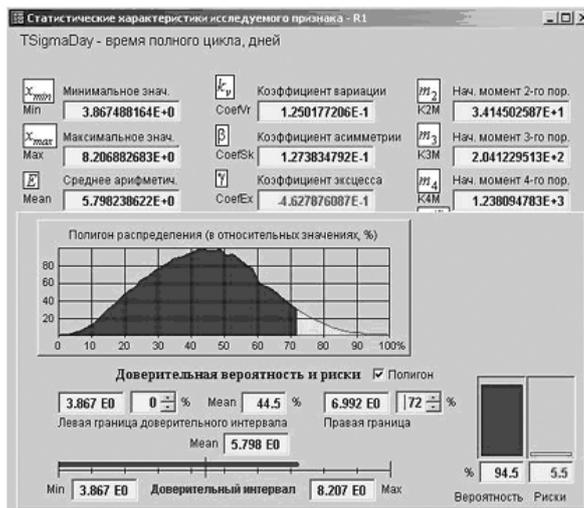


Рисунок 1 – Экранная форма с результатами прогнозирования времени полного цикла создания корпуса видеомодуля



Рисунок 2 – Общее время формообразования на установке SLA корпуса видеомодуля

признака можно уменьшить до 72% от исходного - 3.87÷7 дн. При этом риски того, что полный цикл создания изделий выйдет за границы установленного интервала, соответствуют 5.5%.

Результаты статистического прогнозирования общего времени формообразования на установке SLA представлены на рис. 2. Общее время формообразования изделий для заданных условий расчета находится в исходном интервале значений 7.01÷29.7 час. и имеет среднеарифметическое значение 14.66 час. Установка нового доверительного интервала показывает, что интервал исследуемого признака можно уменьшить до 62% от исходного - 7.01÷21.07 час. При этом риски того, что полный цикл создания изделий выйдет за границы установленного интервала, соответствуют 5.4%.

На базе проведенного статистического прогнозирования был заключен договор на создание этих изделий. В табл. 2 приведены результаты статистического прогнозирования временной цепи полного цикла создания изделий.

Корпус видеомодуля в ЧАО "Конструкторско-технологическое бюро верификационного моделирования и подготовки производства" изготавливался по технологии лазерной стереолитографии на установке SLA-5000 с точностью ±0.1 мм на максимальных размерах, а в отдельных местах (координаты отверстий) с точностью ±0.05мм, что при такой ажурной конфигурации изделия являлось проблемой для традиционных способов обработки.

Таблица 2 – Сравнительные результаты по определению срока выполнения проекта создания корпуса видеомодуля (SLA)

Обозн	Ед.	Наименование	Статистическое прогнозирование	Факт
T3D mod	час	3D модель	$Triang(x, X_{min} = 16, X_{mod} = 18, X_{max} = 32)$	24
TForm	час	формобр. SLA	7÷21 при уровне риска 5.4%	16
TPP1	час	постпроцесс 1	$Trapez(x, X_{min} = 1, X_{mod1} = 2, X_{mod2} = 4, X_{max} = 5)$	3
TPP2	час	постпроцесс 2	0	-
TPP3	час	постпроцесс 3	$Rand(x, X_{min} = 9, X_{max} = 24)$	16
TSigma	дн.	полный цикл	3.9÷7 при уровне риска 5.5%	7.1

Время изготовления при использовании традиционных технологий составляло около двух месяцев при отсутствии гарантий по качеству и точности изготовления, а также при крайне низком коэффициенте использования материала.

Применение лазерной стереолитографии позволило снять проблемы точности и скорости изготовления, однако у заказчика осталась проблема достаточно высокой стоимости.

59

Рекомендации по определению срока выполнения проектов изготовления изделий с использованием технологии SLS

Рассмотрим на примере прессформы для изготовления турбинных лопаток. Работы проводились с ЧФ «АЗОТМАШСЕРВИС», специализирующимся на восстановлении работоспособности газотурбинных насосных установок импортного производства. Предполагали создание прессформы предназначенной для получения карбамидной модели с последующим переходом к стальному литью по выплавляемым моделям.

Планировалось решение следующих задач:

- 3D проектирование прессформы;
- построение одноместной прессформы с применением технологии селективного лазерного спекания порошка нержавеющей стали с последующей пропиткой бронзой;
- механическая обработка поверхностей смыкания и ручная полировка пера лопатки.

Создание данной прессформы выполнялось по технологии селективного лазерного спекания. Использовался материал ST-100 (нержавеющая сталь с последующей пропиткой бронзой).

При прогнозировании времени полного цикла создания данной прессформы параметры имели следующие типы и значения представленные в табл. 3.

Результаты статистического прогнозирования полного цикла создания изделий представлены на рис. 4. Полный цикл создания изделий для заданных условий расчета находится в исходном интервале значений 12.63÷21.85 дн. и имеет среднеарифметическое значение 16.49 дн. Установка нового доверительного интервала, показывает, что интервал исследуемого признака можно уменьшить до 71% от исходного - 12.63÷19.18 дн. При этом риски того, что полный цикл создания изделий, выйдет за границы установленного интервала, соответствуют 5.4%.

Результаты статистического прогнозирования общего времени формообразования на установке SLS представлены на рис. 5. Общее время формообразования изделий для заданных условий расчета находится в исходном интервале значений 9.891÷20.76 час. и имеет среднеарифметическое значение 13.91 час. Установка нового доверительного интервала, показывает, что интервал исследуемого признака можно уменьшить до 65% от исходного - 9.891÷16.95 час. При этом риски того, что полный цикл создания изделий, выйдет за границы установленного интервала, соответствуют 5.2%.

На базе проведенного статистического прогнозирования был заключен договор на создание этих изделий. В табл. 4 приведены результаты

60

Таблица 3 - Параметры при прогнозировании полного цикла изготовления прессформы для изготовления турбинных лопаток (SLS)

Об.	Типы и значения параметров
T_{3Dmod}	время создания электронных 3D моделей изделий - стохастический нечеткий параметр Par1: распределение $Trapez(x, X_{min} = 2.000 E1, X_{mod1} = 2.800 E1, X_{mod2} = 3.200 E1, X_{max} = 4.000 E1)$
T_{PP1}	продолжительность постпроцесса № 1 - стохастический параметр Par3: распределение $Rand(x, X_{min} = 4.000 E0, X_{max} = 8.000 E0)$
T_{PP2}	продолжительность постпроцесса № 2 - стохастический нечеткий параметр Par4: распределение $Trapez(x, X_{min} = 2.000 E1, X_{mod1} = 2.400 E1, X_{mod2} = 2.800 E1, X_{max} = 3.200 E1)$
T_{PP3}	продолжительность постпроцесса № 3 - стохастический нечеткий параметр Par5: распределение $TrapezRight(x, X_{min} = 4.800 E1, X_{mod} = 6.400 E1, X_{max} = 9.600 E1)$
T_{Home}	подготовительные операции - стохастический параметр Par6: распределение $Rand(x, X_{min} = 2.500 E0, X_{max} = 4.500 E0)$
T_{End}	заключительные операции - стохастический параметр Par7: распределение $Rand(x, X_{min} = 1.000 E1, X_{max} = 0.200 E0)$
Y_A	ширина рабочей области, занимаемой изделиями по оси Y - детерминированный параметр Par8: значение 2.600 E2
H_W	высота рабочей области, занимаемой изделиями по оси Z - детерминированный параметр Par9: значение 7.000 E1
S_A	площадь рабочей области, занимаемой изделиями - детерминированный параметр Par10: значение 6.760 E4
K_S	вероятностный коэффициент заполнения рабочей области изделиями - стохастический параметр Par11: распределение $Rand(x, X_{min} = 0.700 E0, X_{max} = 0.800 E0)$
K_T	вероятностный коэффициент размера сечения по оси Y - для SLS не учитывается
D_L	диаметр пятна лазерного луча - стохастический параметр Par13: распределение $Rand(x, X_{min} = 0.230 E0, X_{max} = 0.270 E0)$
V_L	скорость луча лазера - стохастический параметр Par14: распределение $Rand(x, X_{min} = 6.000 E3, X_{max} = 8.000 E3)$

61

продолжение табл. 3

Об.	Типы и значения параметров
h_C	толщина формируемого единичного слоя - детерминированный параметр Par15: значение 1.000 E1
K_{PR}	коэффициент проходов луча при построении изделий - стохастический нечеткий параметр Par16: распределение $TriangRight(x, X_{min} = 1.000 E0, X_{max} = 2.000 E0)$
H_A	высота (по координате Z) дополнительных технологических элементов - стохастический параметр Par17: распределение $Rand(x, X_{min} = 2.500 E0, X_{max} = 3.500 E0)$
K_{AB}	коэффициент заполнения дополнительных технологических элементов - детерминированный параметр Par18: значение 1.000 E0
K_{AR}	коэффициент проходов луча при построении дополнительных технологических элементов - детерминированный параметр Par19: значение 1.000 E0
h_{WP}	глубина дополнительного опускания платформы при построении изделий - детерминированный параметр Par20: значение 0.000 E0
h_{AP}	глубина дополнительного опускания при построении технологических элементов - детерминированный параметр Par21: значение 0.000 E0
V_P	скорость опускания рабочей платформы - стохастический параметр Par22: распределение $Rand(x, X_{min} = 1.000 E0, X_{max} = 3.000 E0)$
L_C	длина рабочего хода выравнивающего элемента установки - детерминированный параметр Par23: значение 1.200 E3
V_C	скорость перемещения выравнивающего элемента установки - стохастический параметр Par24: распределение $Rand(x, X_{min} = 1.600 E2, X_{max} = 1.900 E2)$
K_{PC}	коэффициент числа проходов выравнивающего элемента установки при построении изделий - для SLS не учитывается
T_{WD}	время выдержки при построении изделий - стохастический нечеткий параметр Par26: распределение $TriangRight(x, X_{min} = 4.000 E0, X_{max} = 6.000 E0)$
T_{AD}	время выдержки при построении технологических элементов - стохастический нечеткий параметр Par27: распределение $TriangRight(x, X_{min} = 4.000 E0, X_{max} = 6.000 E0)$

62

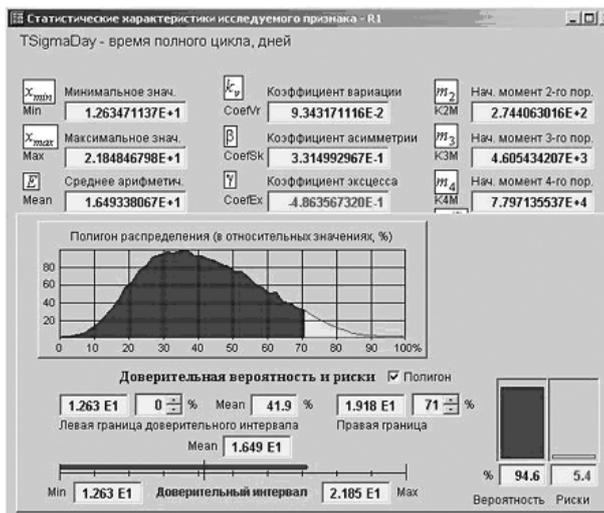


Рисунок 3 – Экранная форма с результатами прогнозирования времени полного цикла создания прессформы для изготовления турбинных лопаток



Рисунок 4 – Общее время формообразования прессформы для изготовления турбинных лопаток (SLS)

статистического прогнозирования временной цепи полного цикла создания изделий.

Таблица 4 – Сравнительные результаты по определению срока выполнения проекта создания прессформы для изготовления турбинных лопаток

Обозн	Ед.	Наименование	Статистическое прогнозирование	Факт
$T_{3D mod}$	час	3D модель	$Trapez(x, X_{min} = 20, X_{mod1} = 28, X_{mod2} = 32, X_{max} = 40)$	32
T_{Form}	час	формобр. SLS	9.9±17 при уровне риска 5.2%	12
T_{PP1}	час	постпроцесс 1	$Rand(x, X_{min} = 4, X_{max} = 8)$	6
T_{PP2}	час	постпроцесс 2	$Trapez(x, X_{min} = 20, X_{mod1} = 24, X_{mod2} = 28, X_{max} = 32)$	26
T_{PP3}	час	постпроцесс 3	$TrapezRight(x, X_{min} = 48, X_{mod} = 64, X_{max} = 96)$	80
T_{Sigma}	дн.	полный цикл	12.6±19.2 при уровне риска 5.4%	17

Проведенные исследования показали, что использование статистического прогнозирования для решения задач расчета временных цепей при создании изделий методами лазерной стереолитографии и селективного лазерного спекания является эффективным инструментом анализа существующих и проектируемых рабочих процессов. Разработанная система статистического моделирования обеспечивает возможность разработки рекомендаций по определению срока и оценки рисков выполнения проектов изготовления изделий в заданные сроки.

Список использованных источников: 1. Аверченков В.И., Федоров В.П., Хейфец Б.Я. Основы математического моделирования технических систем: Учеб. пос. - Брянск: БГТУ, 2004. - 271 с. 2. Алтухин А.Е., Семухин М.В. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях: Монография. - Тюмень: Изд-во Тюменского гос. университета, 2000. - 352 с. 3. Базров Б.М. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов. - М.: Машиностроение, 2005. - 736 с. 4. Грабченко А.И., Доброскок В.Л., Чернышов С.И., Абдураимов Л.Н. Обобщенная модель времени полного цикла изготовления изделий генеративными технологиями макроуровня // Високи технологии в машинобудованні: 36. наук. пр. - Харків: НТУ "ХПІ", - 2006. - Вип. 1(12). - С. 3-16. 5. Джексон П. Применение методов Монте-Карло в финансах: Пер. с англ. - М.: Интернет-трейдинг, 2004. - 256 с. 6. Дубров А.М., Лагоша Б.А., Хрусталева Е.Ю. Моделирование рисков ситуации в экономике и бизнесе: Учеб. пособие / Под ред. Б.А. Лагоши. - М.: Финансы и статистика, 2000. - 176 с. 7. Ермаков С.М., Михайлов Г.А. Статистическое моделирование. - М.: Наука, 1982. - 296 с. 8. Неосексин А.О. Нечетко-множественный анализ риска фондовых инвестиций. - Л.: Санкт-Петербург, 2002. - 181 с. 9. Орлов А.И. Высокие статистические технологии // Заводская лаборатория. - 2003. - Т. 69. - № 11. С. 55-60. 10. Орлов А.И. Экспертные оценки // Заводская лаборатория. - 1996. - Т. 62. - № 1. - С. 54-60. 11. Чернышов С.И., Доброскок В.Л., Витязев Ю.Б., Гаращенко Я.Н. Обобщенная модель технологического времени генеративных технологий макроуровня // Високи технологии в машинобудованні: 36. наук. пр. - Харків: НТУ "ХПІ", - 2006. - Вип. 1(12). - С. 537-551.

Поступила в редакцию 04.06.2012.

63

64

В.Д. Гончаров, канд. техн. наук, В.И. Яковлев, канд. техн. наук,
А.А. Ситников, д-р техн. наук, А.В. Собачкин,
М.Н. Сейдуров, канд. техн. наук, Барнаул, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКИ ПОРОШКОВЫМ ЭЛЕКТРОДОМ ИЗ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СВС-МЕХАНОКОМПОЗИТОВ

Работа посвящена актуальной теме получения износостойких электродуговых покрытий из синтезированных порошковых наноструктурированных композиционных материалов нового класса методом механически активированного высокотемпературного синтеза. Рассмотрены приемы получения механоактивационной попередней обработки порошковых смесей в планетарной шаровой мельнице АГО-2 и высокотемпературного синтеза в механоактивированном прекурсоры. Выведено характер зносу важковантажных виробів, наплавляемых электродуговим способом експериментальним порошковим електродом. Встановлено, що введення в поверхневий шар наплавляемого покрытия синтезованих високотвердих часток (карбідів металів) за допомогою порошкових електродів з СВС-матеріалів істотно підвищує зносостійкість наплавляемого шару.

Ключові слова: механоактиваційна обробка, порошкова суміш, високотемпературний синтез (СВС), композиційний наноструктурований матеріал, порошковий електрод, електродугове наплавляння.

Работа посвящена актуальной теме получения износостойчивых электродуговых покрытий из синтезированных порошковых наноструктурированных композиционных материалов нового класса методом механически активированного самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Рассмотрены приемы получения механоактивационной предварительной обработки порошковых смесей в планетарной шаровой мельнице АГО-2 и самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в механоактивированных прекурсорах. Изучен характер износа тяжело нагруженных изделий, наплавляемых электродуговим способом экспериментальным порошковым электродом. Установлено, что введение в поверхностный слой наплавляемого покрытия синтезированных высоко твердых частиц (карбидов металлов) с помощью порошковых электродов из СВС-материалов существенно повышает износостойкость наплавляемого слоя.

Ключевые слова: механоактивационная обработка, порошковая смесь, самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), композиционный наноструктурированный материал, порошковый электрод, электродуговая наплавка.

The work is devoted to the vital topic of obtaining wear-resistant coatings elektrodugovykh powder synthesized nanostructured composite materials using a new class of mechanically activated self-propagating high temperature synthesis. We consider methods of obtaining mekhanoaktivatsionnoy pre-processing of powder mixtures in a planetary ball mill АГО-2 and self-propagating high-temperature synthesis of mechanically activated precursors. The character of wear heavy-duty products, clad electric arc method experimental powder electrode. It is established that the introduction of the surface layer of the deposited coating synthesized of very hard particles (carbides) with electrodes made of powder SHS materials significantly increases the wear resistance of the deposited layer.

Keywords: mekhanoaktivatsionnaya processing, powder mixture, self-propagating high temperature synthesis (SHS) nanostructured composite material, powdered electrode arc welding

рых другими известными способами требует больших затрат и/или сложного дорогостоящего оборудования либо вообще невозможно.

Эффективным средством, позволяющим целенаправленно влиять на структурное состояние реакционной шихты и параметры СВС, обеспечивая тем самым возможность регулирования механизмов фазо- и структурообразования материалов в процессе синтеза, а также воспроизводимость результатов, является предварительная механоактивационная обработка.

Новым является метод механически активируемого самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, основанный на сочетании механоактивации и СВС и представляющий собой двустадийный процесс. На первом этапе реакционная шихта обрабатывается в течение сравнительно короткого времени в энергонапряженном аппарате – активаторе, на втором – используется в качестве реакционной смеси для СВС.

Известно, что в основе СВС лежит использование тепла, которое выделяется в ходе экзотермической реакции взаимодействия реагентов. СВС представляет собой типичный неизотермический процесс, характеризующийся экстремальными условиями синтеза: высокими скоростями нагрева исходных компонентов ($10^3 - 10^6$ град/с), резким градиентом температуры (до 10^5 К/см), высокими температурами (до 4000 К) и малыми временами синтеза (от долей секунд до нескольких минут).

В зависимости от условий СВС может протекать в двух режимах: сплошного горения и объемного теплового взрыва. Например, в режиме сплошного горения химическая реакция после ее локального инициирования самопроизвольно перемещается по веществу в виде узкой зоны (волны горения). Тепло, подводимое к поверхности образца, прогревает поверхностный слой и инициирует экзотермическую реакцию. Вблизи поверхности формируется фронт горения, который начинает самопроизвольно распространяться вдоль образца. Температура в волне горения изменяется от начальной до максимальной за счет тепловыделения химических реакций температуры горения. Температура горения играет ключевую роль в протекании процесса СВС и формировании конечных продуктов горения. Также известно, что СВС в многокомпонентных системах позволяет получать сложные легированные соединения. Дополнительное использование механоактивации существенно расширяет возможности таких материалов.

Следует отметить, что механоактивация позволяет модифицировать условия протекания СВС-процессов. Вопросам экспериментального исследования механоактивации на параметры СВС посвящено большое количество публикаций. Большинство авторов в качестве основных видов воздействия механоактивации на СВС отмечают существенное снижение температуры и времени начала взаимодействия реагентов, увеличение скорости химических реакций и повышение полноты превращения для активированных систем. Кроме того, механоактивация позволяет существенно изменить величину и

Сверхнормативная изношенность (до 80%) оборудования предприятий, и как следствие грядущий кризис из-за остановки выработавших свой ресурс установок, возможность техногенных катастроф во многом могут быть предотвращены в результате использования методов получения покрытий, как одной из самых эффективных ремонтных технологий, обеспечивающих полное восстановление геометрии и работоспособности большинства изношенных деталей.

Электродуговая наплавка занимает прочные позиции в производстве и реновации деталей машин и механизмов различных отраслей промышленности. В результате наплавки при изготовлении деталей можно получить рабочую поверхность, обладающую необходимым комплексом свойств: износостойкостью, термостойкостью, жаростойкостью, коррозионной стойкостью и т.п. При ремонте наплавка позволяет восстановить первоначальные размеры и эксплуатационные свойства деталей. В настоящее время возрастает актуальность использования восстановленных деталей при ремонте автомобилей, автотракторной и сельскохозяйственной техники, пищевого и промышленного оборудования. Используя наплавку, можно уменьшить расход металла на изготовление запасных частей оборудования. При восстановлении изношенных деталей затраты на материалы и количество технологических операций сокращается в 5 – 8 раз, что по сравнению с изготовлением новых деталей способствует экономии металла, топливно-энергетических и других природных ресурсов.

При этом за счет модифицирования поверхности детали, можно значительно увеличить срок службы оборудования в целом, что особенно важно, если от надежности и долговечности последнего зависит работа высокопроизводительного оборудования, а замена таких деталей связана с длительными простоями агрегатов. Этим обусловлена большая экономическая и техническая эффективность наплавки в практически любой отрасли машиностроения.

Одним из перспективных методов получения порошковых материалов для защитных покрытий является самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС).

В основе метода СВС лежит реакция экзотермического взаимодействия двух или нескольких химических элементов, протекающая в режиме направленного горения после локального инициирования процесса.

Специфическое преимущество СВС-процессов заключается в отсутствии или существенном снижении энергозатрат за счет использования экзотермического эффекта реакций и в высокой скорости синтеза. Благодаря таким особенностям СВС, как высокая температура, превышающая в большинстве случаев температуру плавления хотя бы одного из реагентов, высокая скорость внутреннего саморазогрева, протекание реакций в условиях резкого градиента температур, метод позволяет получать материалы с повышенными свойствами, а в ряде случаев удается синтезировать композиции, получение кото-

характер тепловыделения, температуру и скорость горения, а также механизм и кинетику процессов взаимодействия компонентов (условия протекания химических реакций и их стадийности).

Обычно при изучении влияния механоактивации на гетерогенные реакции авторами рассматриваются два типа воздействия, которые условно можно обозначить как микроструктурные и энергетические. Микроструктурные воздействия сводятся к измельчению реагентов и увеличению площади контакта между ними, что приводит к ускорению реакции. Энергетические воздействия связываются с аккумулярованием дополнительной энергии в кристаллической решетке вследствие накопления остаточных упругих или пластических деформаций при механическом воздействии. Во многих случаях микроструктурные и энергетические аспекты действуют совместно, и различить их сложно. Влияние механоактивации на параметры СВС объясняют влиянием дефектов кристаллического строения и соответствующей энергии, накопленных в металле при периодической пластической деформации во время механоактивации, а также снижением эффективной энергии активации реакции при последующем нагреве в волне СВС.

Следует отметить, что СВС-реакцию можно проводить и с использованием «инертных» в химическом плане добавок (матриц), при использовании которых реакция синтеза предварительно механоактивированных веществ происходит в объеме этой матрицы. Подобные добавки являются эффективным средством управления процессом формирования структуры синтезируемого композита. «Инертные» матрицы, не меняющие состав конечных продуктов, снижают температуру и скорость горения и приводят к сильному модифицированию структуры СВС-материалов (существенно уменьшается размер зерна, повышается однородность структуры). Это связано с тем, что, выполняя функции разбавителя (поскольку в продуктах реакции не обнаружено соединений исходных реагентов с материалом матрицы) матрицы одновременно являются дополнительными центрами кристаллизации на ранней стадии структурообразования, способствуя процессу гетерогенного зародышеобразования уже на стадии первичного структурообразования. При этом тормозятся процессы рекристаллизации и роста зерен в волне горения. Дополнительное использование механоактивации не только обеспечивает равномерное распределение реагирующих частиц по объему матрицы, но и влияет на морфологию и дефектность структуры порошковых смесей.

В общем случае продукт механически активируемого самораспространяющегося высокотемпературного синтеза характеризуется более тонкой (с наноразмерными включениями) и гомогенной структурой при повышенной глубине превращения по сравнению с СВС-продуктами без использования механоактивации. При этом в зависимости от типа активатора и режима механообработки можно существенно менять как механизм процесса, так и фазовый состав получаемого продукта. Кроме того, особенности взаимодействия

вия реагентов в механоактивированных материалах (снижение температуры и увеличение скорости химического реагирования) обеспечивает возможность проведения процесса на воздухе без окисления. При этом механоактивация позволяет получать методом СВС легированные материалы с повышенной концентрацией легирующих элементов (выше значения предельной растворимости). Исходные порошки в зависимости от способа получения могут иметь различную форму частиц – от правильной глобулярной до осколочной. Однако после обработки порошковой смеси в активаторе ее частицы приобретают характерную осколочную форму, а в целом смесь представляет собой слоистый композит. Выполнено исследование образцов композита с помощью методики растровой электронной микроскопии (РЭМ), результаты которой приведены на рис. 1.

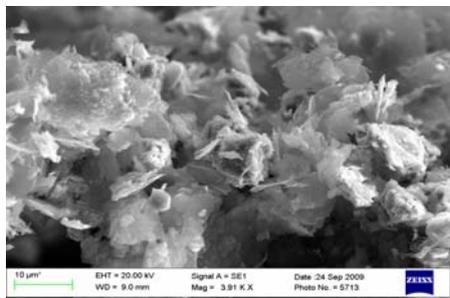


Рисунок 1 – РЭМ-изображение порошковой смеси исходного механокомпозита после обработки в активаторе

Термограмма проведения СВС-реакции была получена с использованием микротермопар типа ВР-5/20 и с помощью АЦП и компьютерной программы (рис. 2).

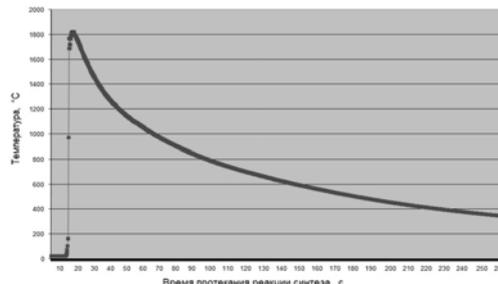


Рисунок 2 – Термограмма СВС-синтеза карбида титана в никель-хромовой матрице

Результаты РЭМ-анализа приведены на рисунке 3.

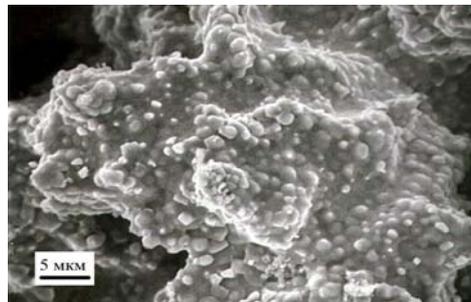


Рисунок 3 – SEM-изображение продукта СВС-реакции

С целью выявления рациональных режимов ручной дуговой наплавки порошковым электродом были выполнены практические испытания с построением ВСХ – внешней статической (вольт-амперной) характеристики. При этом проверялось пять показателей сварочных свойств: начальное зажигание дуги, стабильность процесса наплавки, разбрызгивание металла, качество формирования шва, эластичность дуги. Исследования проводили с помощью сварочного выпрямителя марки ТИТАН-ВС-220А на постоянном токе обратной полярности. Экспериментальные порошковые электроды с содер-

жением TiC+PR-H70X17C4P4-3 (X % масс.) – СВС-механокомпозит имели степень содержания (разбавления) металла матрицы от 80 %, 70 % и 60 %.

Для построения ВСХ сварочного выпрямителя применялись измерительные клещи марки АРРА-А16 и балластный реостат РБ-302У2 (1...4 шт.). При подключении сварочного выпрямителя к балластному реостату устанавливали величину номинального тока. Замер значения тока проводили в течение 2 мин. (отклонение тока от номинального не превышало 5 %).

Затем для определения пределов регулирования сварочного тока выполняли изменение тока от минимального до максимального значения с замером тока. При определении напряжения холостого хода и номинального рабочего напряжения производили замеры напряжения на клеммах источника без нагрузки и под нагрузкой.

Для оценки вида ВСХ при подключении активной нагрузки к выходным клеммам выпрямителя определялись соответствующие значения тока и напряжения.

Серия экспериментов позволила определить вид ВСХ с оценкой рабочего диапазона наплавки порошковым электродом (рис. 4).

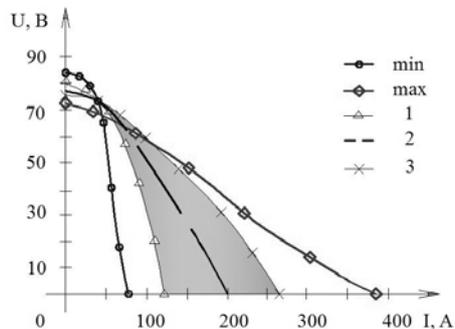


Рисунок 4 – Внешняя статическая характеристика с указанием рабочего диапазона наплавки порошковым электродом: min – минимальный сварочный ток, max – максимальный сварочный ток. В затемненной области: 1, 2, 3 – семейство ВСХ для наплавки порошковыми электродами со степенью разбавления металлом матрицы от 80 %, 70 % и 60 %, соответственно

Вторая серия экспериментов была выполнена при наилучших показателях сварочных свойств (согласно РД 03-614-03), а именно: начальное зажига-

ние дуги – легкое, стабильность процесса наплавки – высокая, разбрызгивание металла – малое, качество формирования шва – очень хорошее, эластичность дуги – высокая.

Таким образом, подобранные режимы по сварочному току от 230 до 254А являются наиболее рациональными для наплавки экспериментальными порошковыми электродами диаметром 5 мм с содержанием TiC+PR-H70X17C4P4-3 (X % масс.) – СВС-механокомпозит со степенью разбавления металлом матрицы от 80 %, 70 % и 60 %.

При исследовании общей структуры покрытий применялось химическое травление 3 % раствором азотной кислоты в этиловом спирте, а при исследовании тонкой структуры покрытий применяли химическое травление в течение 5 мин. водным раствором 20 % красной кровяной соли $K_3[Fe(CN)_6]$ и 20 % КОН. Для определения общего характера внутреннего строения матрицы СВС-механокомпозитов микрошлифы подвергались электрохимическому травлению раствором 15 % хлорной кислоты в уксусной кислоте «ледяная» (время травления 30 с; источник постоянного тока, напряжение 3 В).

Анализ показал, что по мере уменьшения степени разбавления СВС-механокомпозита состава TiC+X % Me (P6M5, PR-H70X17C4P4-3) металлом матрицы значительно возрастает количество крупных карбидных частиц различной формы, выделяющихся внутри зерна (рис. 5). Использование при наплавке матрицы типа TiC+P6M5 (X % масс.) приводит к выпадению мелких карбидов по границам в виде сетки.

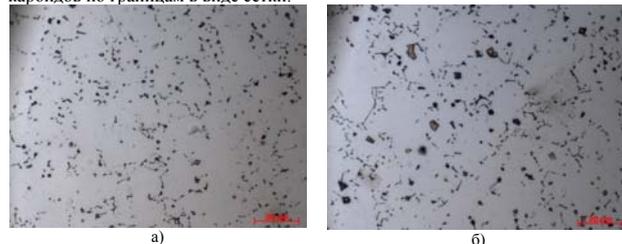


Рисунок 5 – Микроструктура наплавленного металла из порошков СВС-механокомпозитов состава TiC+P6M5 (X % масс.): а – 60; б – 20

В качестве оборудования для исследования износостойкости наплавки использовалась машина трения, предназначенная для испытаний различных frictionных и смазочных материалов на трение и износ с максимальным моментом трения 40 Н·м и максимальной частотой вращения шпинделя 3000 мин⁻¹.

Для выбора параметров испытаний использовался ГОСТ 17367-71 «Металлы. Метод испытания на абразивное изнашивание при трении о закрепленные абразивные частицы».

Исследования проводились с использованием специально изготовленных образцов представляющих собой гладкие цилиндрические образцы соответствующих размеров. В качестве абразивного материала был выбран диск, который изготавливался из абразивной листовой шкурки марки Л2Э620×50С115А25-ВМА ГОСТ 6456-82. В качестве абразивного материала использован электрокорунд нормальный А15 зернистостью 25 (ГОСТ 3647-71).

Результаты испытаний по определению весового износа наплавленных покрытий в зависимости от степени разбавления металла матрицы карбидами представлены в таблице и на рисунке 6.

Таблица – Результаты исследования износостойкости наплавленных покрытий

Серия испытаний	Степень разбавления металлом матрицы, % масс			Сравнительное испытание (сталь 45)
	90	80	70	
	Весовой износ, г			
1	0,0487	0,0523	0,0372	0,2581
2	0,0391	0,0341	0,0259	0,2422
3	0,0471	0,0382	0,0228	0,2329
4	0,0464	0,0302	0,0132	0,2174

По результатам исследования износостойкости установлено, что наплавленные дугowym способом покрытия из порошков СВС-механокомпозиатов, обеспечивает повышение износостойкости и твердости покрытия.

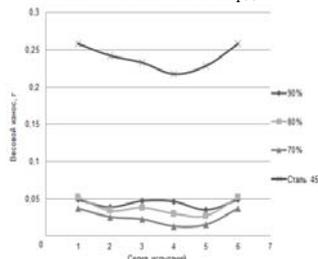


Рисунок 6 – Весовой износ наплавленных образцов

Выводы:

По итогам работы можно сделать вывод, что метод механически активируемого самораспространяющегося высокотемпературного синтеза позволяет

создавать и использовать порошковые СВС-материалы в качестве материала порошкового электрода (проволоки). Использование порошковых электродов для электродуговой наплавки обеспечивает структуру наплавленного слоя с равномерным распределением упрочняющего карбидного зерна по объему наплавки.

Таким образом, применяемый способ повышения износостойкости с помощью порошковых электродов из СВС-материалов позволит существенно (в 3-5 раз) увеличить срок службы быстрознашивающихся деталей и узлов (рабочих органов сельскохозяйственной техники, например стрелчатых лап культиваторов и сеялок).

Список использованных источников: 1. Влияние механической активации исходных компонентов на СВС сплайсов нитибы / О. А. Шкода, О. Г. Терехова, Л. Д. Чалых // Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: материалы и технологии. Новосибирск: Наука, 2001. С. 216-221. 2. Реновация деталей металлургического оборудования наплавкой / Ф. П. Каченко, А. И. Белыев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2006. № 1. С. 3-6. 3. Перспективные способы наплавки и механической обработки восстанавливаемых деталей / А. В. Иванов, О. Л. Пирозерская // Техно-технологические проблемы сервиса. 2010. № 3 (13). С. 7-9. 4. Влияние механоактивации на процессы фазо- и структурообразования при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе / Н. З. Ляхов, Т. Л. Такао, Т. Ф. Григорьева. Новосибирск: Параллель, 2008. 168 с. 5. Структура и свойства наплавленных электродугowych покрытий из порошков механоактивированных СВС-композиатов / А. А. Ситников, В. И. Яковлев, М. Н. Сейдуров и др. // Обработка металлов. 2011. № 3 (52). С. 51-54. 6. Интегральные технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / В. В. Евстигнеев, Б. М. Вольпе, И. В. Милова и др. М.: Высшая школа, 1996. 284 с. 7. Покрытия из механоактивированных СВС-материалов для рабочих органов сельскохозяйственных машин, наплавленные ручным дугowym способом / А. А. Ситников, В. И. Яковлев, А. В. Собачкин и др. // Ползуновский вестник. 2012. № 1/1. С. 273-277. 8. Людоговский А. В. Газотермическое напыление покрытий: учебное пособие. М.: РГОТУПС, 2006. 43 с. 9. Собачкин А. В. Структура износостойких покрытий из порошков СВС-механокомпозиатов, наплавленных ручным дугowym способом // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых, Выпуск 2. СПб.: НИУ ИТМО, 2012. С. 182-184. 10. Износостойкие покрытия из СВС-материалов, наплавленные порошковым электродом / А. В. Собачкин, А. А. Ситников, В. И. Яковлев // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе: материалы 10-ой Всероссийской научно-практической конференции. Новосибирск: Издательство Новосибирского государственного технического университета, 2012. С. 199-203.

Поступила в редакцию 24.05.2012

УДК 621.91

А.И. Грабченко, д-р техн. наук, В.А. Фадеев, д-р техн. наук,
Харьков, Украина

О СИСТЕМАХ МИКРО- И НАНОРЕЗАНИЯ

Рассмотрено понятие, структура и особенности систем микро- и нанорезания, сравнение их с конвенциональными системами резания, предложено классифицировать уровни систем нанорезания по содержанию в них количества нанообъектов.

Розглянуто поняття, структуру і особливості систем мікро- та нанорезання, порівняння їх з конвенціональними системами різання, запропоновано класифікувати рівні систем нанорезання по наявності в них кількості нанооб'єктів.

The concept, structure and systems, especially micro-and nanorezaniya, comparing them with the Conventional system Mami cut, asked to classify the levels of systems nanorezaniya in their content of nano-objects.

Развиваясь и познавая окружающую природу, человечество прежде всего обращало внимание на предметы и явления макромира. Когда пришло время, характеризующее бурным развитием инструментов познания, методов и средств моделирования, всепроникающего значения информационных технологий, ученые и работники различных отраслей производства, медицины, бизнесмены, аграрии и т.д. обращают свои взоры на объекты, различные эффекты и явления в нанометрической области (до 100 нм). Сегодня уже идет речь о практическом использовании нанотехнологий, являющихся междисциплинарным направлением, в комплексе охватывающем различные разделы науки и практики в области физики, механики, химии, биологии, электроники и т.д., для решения глобальных проблем, встающих перед человечеством [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. В соответствие с этим появилось множество новых терминов и понятий с приставкой «нано», используемой в значении «относящейся к нанодиапазону» материального мира: нанообъекты, нанокристалл, нанокластер, наноструктура, наносистема, наноматериалы, наноструктурированный материал, наноаука и др. [9, 10, 11, 12, 13].

Элементарными объектами нанотехнологии (наномасштабными, наноразмерными элементами), позволяющими искусственно конструировать функциональные материалы с заранее заданными свойствами и структурой, являются атомы, молекулы, атомные кластеры и частицы, нанопорошки, нанослойные покрытия, нанотрубки и нанотрубки, квантовые ямы, проволоки, точки и др.

В зависимости от предельно достижимой точности, которая обеспечивается рассматриваемыми процессами резания, их делят на традиционные (конвенциональные) – (с размерами от 100 мкм до 5 мкм), прецизионные (от 10 до 0,5 мкм), ультрапрецизионные (до 0,001 мкм). Следующий диапазон для микро- и нанорезания приближается к предельным теоретическим значениям, ограничением которых являются размеры молекул или атомов вещества (0,2-0,3 нм).

Понятие микрообработки предполагает реализацию различных процессов разделения материала режущим лезвием или модификациями этих процессов в микрометрическом диапазоне (от 1 мкм до 999 мкм), слишком малом для обработки традиционным резанием [14].

В отличие от конвенциональных процессов резания микро- и нанообработка ориентирована на новейшие технологии, которые базируются на изменении структуры молекул или материалов в нанометрическом диапазоне. В ряде случаев реальное удаление (съем) материала ограничивается приповерхностным слоем, толщина которого может составлять всего лишь несколько атомов или атомных слоев.

Таким образом, нанорезание относится к диапазону точности, верхней границей которого является нижняя граница микрорезания, а нижней – параметры кристаллической решетки вещества. При этом в нанометрическом диапазоне измеряются параметры сечения срезаемого слоя, уровень качества поверхности (Ra до 5 нм), размеры изделия (до 1 мкм). Приведенные численные значения диапазонов являются достаточно условными, поэтому рекомендуется воспринимать их как ориентировочные.

В соответствии с [15,16], система конвенционального резания (рабочий процесс) представляет собой сложный комплекс взаимозависимых и взаимообусловленных явлений и процессов, которые сопровождают отделение от заготовки срезаемого слоя и формирование новой поверхности: относительное движение заготовки и инструмента, упругие и пластические деформации и разрушение; стружкообразование, трение и адгезия на рабочих поверхностях инструмента; теплообразование и теплоотвод; наростообразование; износ инструмента; физико-химико-механические изменения обрабатываемого и инструментального материалов; электрические, химические, диффузионные и др. процессы. Принципиально важными объектами системы резания являются свойства обрабатываемых и инструментальных материалов, геометрические параметры режущего лезвия, радиус округления режущей кромки (r), параметры срезаемого слоя, технологическая среда.

Системы микро- и нанорезания от конвенциональных отличаются тем, что их составляющими являются нанообъекты, размеры которых (или их элементов), принято измерять в нанометрах в пределах до 100 нм. Речь идет, прежде всего, о конструкционных и инструментальных наноматериалах (наноструктурированных, наноструктурных, нанокристаллических, наноматричных). Эти материалы обладают качественно иными физическими, химическими, механическими, биологическими, функциональными и эксплуатационными характеристиками.

Полному содержанию понятия системы нанорезания соответствует такая, у которой все ее составляющие могут быть отнесены к нанообъектам:

- наноструктурированный конструкционный материал;
- наноструктурированный инструментальный материал;
- наноразмерные геометрические параметры режущего лезвия (например, ρ);
- нанометрические параметры срезаемого слоя (например, a);
- технологическая среда, в том числе содержащая твердые наночастицы (например, нанопорошок алмаза).

Реализация процесса резания в размерном нанодиапазоне обеспечивается чрезвычайно высокой прецизионностью и жесткостью станков, инструмента, высокой точностью относительных перемещений в системе, управлением и измерениями. Любая система нанорезания должна располагать чрезвычайно острыми, как правило, алмазными режущими инструментами, шпинделями на воздушных подушках, пневматическими и гидравлическими направляющими, высоким разрешением регулирования точности подачи, нейтрализацией вибраций, контролем температуры и т.д. Станки устанавливаются на гранитном основании, помещенном на пневмоподвеску. Переключающиеся элементы станка приводятся в движение серводвигателями посредством гидростатических винтов или напрямую посредством линейных двигателей. Шпиндель обычно оснащен аэрозастычками или гидростатическими подшипниками. Новейшие ультрапрецизионные станки имеют четырех или пятикоординатное числовое программное управление с разрешающей способностью менее одного нанометра за один шаг.

Такую систему резания можно рассматривать как идеальную систему первого уровня. На практике такого сочетания нанообъектов в системе резания достигнуть достаточно сложно.

В тоже время значимыми могут оказаться и даже такие сочетания, когда в обычную систему резания входит хотя бы один или несколько нанообъектов.

77

Как системы нанорезания второго уровня можно рассматривать такие, которые содержат хотя и не полный, но все-таки преобладающий состав нанообъектов. Пример системы нанорезания второго уровня: наноструктурированный обрабатываемый материал, наноструктурированный инструментальный материал, нанометрические параметры срезаемого слоя, нанометрический размер радиуса округления режущей кромки r .

К системам нанорезания третьего уровня можно отнести такие, в составе которых нанообъекты присутствуют, но не преобладают. Пример наносистемы третьего уровня: только наноструктурированный обрабатываемый материал и СОТС с наноразмерными добавками; второй вариант – только наноструктурированное покрытие на режущем инструменте, а остальные объекты системы резания – традиционные (конвенциональные).

Эти и другие понятия с приставкой «нано» позволяют идентифицировать нанообъект по геометрическому параметру (толщина пленки, размер кластера, диаметр нанотрубки и т.д.).

Но эту приставку «нано» следует воспринимать как обобщенное отражение объектов исследования, прогнозируемых явлений, эффектов и способов их описания, а не только как характеристики протяженности базового структурного элемента.

Тем не менее для системы нанорезания принципиальное значение имеет именно размерный диапазон параметров нанообъектов и их составляющих. Так, например, при резании инструментом из монокристалла алмаза радиус округления нанолезвия составляет от 2 до 45 нм, а толщина срезаемого слоя – до 1 нм.

Важнейшей предпосылкой реализации процессов микро- и нанорезания является потенциал такого нанообъекта системы резания, как наноструктурированный инструментальный материал (покрытие) на режущей части лезвийных инструментов, на нанопорошках из сверхтвердых и абразивных материалов.

Нанотехнологии получения инструментальных материалов обеспечивают повышение их прочности, твердости, теплопроводности, износостойкости и, как следствие, увеличения скорости резания, производительности обработки, повышение точности и качества обработанной поверхности, а также экономии обрабатываемых материалов. Немаловажным является возможность минимизации и даже полного отказа от применения СОТС, в первую очередь, токсичных.

Дальнейшее развитие процессов микро- и нанорезания стимулируется в большей мере достижениями миниатюризации сложных изделий и производства в целом, разработкой и реализацией нанотехнологий как межотраслевой

78

области знаний и научно-производственного опыта. На основе анализа атомистических моделей контактного взаимодействия нанообъектов системы нанорезания, методов молекулярной динамики могут быть установлены закономерности процессов локального удаления обрабатываемого материала (на атомно-молекулярном уровне), износа режущих инструментов и конструирования высококачественной физической поверхности.

Переключение внимания исследователей на изучение нанообъектов, явлений и эффектов в нанодиапазоне взаимодействия режущего клина и обрабатываемого материала открывает новые возможности познания этого уникального по сути и сложного по структуре процесса и создания на этой основе фундамента для выявления путей и средств коренного повышения производительности, качества и высокой экономичности микро- и нанотехнологий изготовления сложных изделий.

Список использованных источников: 1. Балабанов В.И. Нанотехнологии. Наука будущего. Изво: ЭКСМО, 2009, 131с. 2. Bharat Bhushan (Ed.) – Handbook of Nanotechnology – Springer-Verlag / Berlin Heidelberg, 2010. – 1919 p. 3. Весткемпер Э. Введение в организацию производства [текст]: учеб. пособие / Весткемпер Э., Декер М., Эндоуби Л., Грабченко А.И., Доброскок В.Л.; пер. с нем.; под общ. ред. А.И. Грабченко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008 – 376 с. 4. Головин Ю.И. Введение в нанотехнику / Ю.И. Головин. – М: Машиностр., 2007. – 496 с. 5. Грабченко А.И. Интегрированные генеративные технологии: учеб. пособие для студ. выс. учеб. заведений / А.И. Грабченко, Ю.И. Внуков, В.Л. Доброскок, Л.И. Пуляк, В.А. Федеев; под ред. А.И. Грабченко – Харьков: НТУ «ХПИ», 2011. – 396с. На рус. яз. 6. Кобаяси Н. Введение в нанотехнологию / перев. с японского, 2-изд. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008 – 134 с. 7. Ковшов А.Н., Назаров Ю.Ф., Ибрагимов И.М. Основы нанотехнологий в технике: Учебное пособие. – М.: Изво МГОУ, 2006. – 240 с. 8. Пул Ч. Нанотехнологии / Ч. Пул, Ф. Оуэне; пер. с англ. – М.: Техносфера, 2005 – 336 с. 9. Наноматериалы. Классификация, особенности свойств, применение и технологии получения: Учебное пособие / Б.М. Белоян, А.Г. Колмаков, М.И. Алымов и др. – М. АгроПресс-Дизайн, 2007. – 102 с. 10. Шевченко В.Я. О терминологии: наночастицы, наносистемы, наноконструкции, нанотехнологии / Микросистемная техника. № 9, 2004. – с. 2-4. 11. Валеев Р.З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. / Р.З. Валеев, И.В. Александров. – М.: Логос, 2000. – 272 с. 12. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с. 13. Азаренков Н.А. Наноматериалы, нанополы, нанотехнологии. / Н.А. Азаренков, В.М. Береснев и др. – Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина, 2009. – 209 с. 14. Davim J. Paulo, Jackson J. Mark – Nano and Micromachining, – ISTE – Wiley, London, 2009. – 312 p. 15. Клушин М.П. Оптимизация условий резания на технологической операции / М.П. Клушин // Оптимизация технологических процессов механосборочного производства: Сб. докладов Всесоюзной науч.-техн. конф. – М.: Станкин, 1978. – С. 17-23. 16. Мазур М.П. Основы теорії різання матеріалів: підручник [для виш. навч. закладів] / М.П. Мазур, Ю.М. Внуков, В.Л. Доброскок, В.О. Залоза, Ю.К. Новосолов, Ф.Я. Якубов; під заг. ред. М.П. Мазура – Львів: Новий Світ – 2000, 2010. – 422 с.

Поступила в редколлегию 15.06.2012

79

УДК 621.9.01

Деревянченко А.Г., д-р техн. наук, Бабилунга О.Ю., канд. техн. наук, Соценко А.О., Долинский А.О., Одесса, Украина

НОВЫЙ ПОДХОД К РАСПОЗНАВАНИЮ СОСТОЯНИЙ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ РАБОТОСПОСОБНЫХ И ОТКАЗВШИХ ИНСТРУМЕНТОВ

Приведены результаты разработок нового подхода к распознаванию состояний изношенных и отказавших режущих инструментов. Он основан на использовании нового метода определения классов важной составляющей состояния поверхности инструмента – ее текстуры – по комплексу признаков. Среди признаков текстур поверхностей инструментов впервые использованы марковские поля. Компьютерное моделирование соответствующей интеллектуальной системы подтвердило перспективность применения данного подхода для распознавания различных классов текстур поверхностей изношенных и отказавших инструментов.

Приведені результати розробок нового підходу до розпізнавання станів зношених і відмовивших режущих інструментів. Він заснований на використанні нового методу визначення класів важливої складової стану поверхні інструменту – її текстурі – по комплексу ознак. Серед ознак текстур поверхонь інструментів вперше використані марківські поля. Комп'ютерне моделювання роботи відповідної інтелектуальної системи підтвердило перспективність застосування даного підходу для розпізнавання різних класів текстур поверхонь зношених та відмовивших інструментів.

The results of developments of a new approach to recognition of worn-out and failed cutting tools are resulted. He is based on the use of a new method of recognition of classes of important part of tools surface state – its texture – on the complex of signs. Among the signs of texture tools surfaces the markovskie fields are first used. Computer design of the intellectual system work confirmed perspective of application of this approach for recognition of different classes of worn-out and failed cutting tools surfaces textures.

При разработке систем автоматизированного и автоматического распознавания состояний режущих инструментов (РИ) прецизионной обработки широкое применение находят системы технического зрения (СТЗ) [1]. Регистрируемые СТЗ цифровые изображения контактных поверхностей РИ в работоспособных состояниях (режущая часть (РЧ) частично изношена) и состояниях отказов (пределный износ, множественные выкрашивания, сколы РЧ) обеспечивают формирование контуров зон дефектов, вычисление соответствующих признаков. При этом оценка типов (классов) текстур поверхностей является неотъемлемым элементом процесса многоуровневого распознавания состояний инструментов. Поэтому тематика данной статьи представляется актуальной.

Анализ предыдущих исследований. Составной частью комплекса для автоматического контроля, диагностики и прогнозирования остаточного ресурса РИ является система интеллектуального анализа изображений РЧ [1, 2]. Здесь распознавания классов текстур поверхностей РЧ выполнялось с ис-

80

пользованием оценок энергетических спектров Фурье и матриц смежности участков изображений. Однако многообразие механизмов изнашивания и отказов РИ обуславливает многообразие классов форм и текстур формирующихся при этом поверхностей РЧ, что требует расширения набора признаков и применения комплексного распознавания.

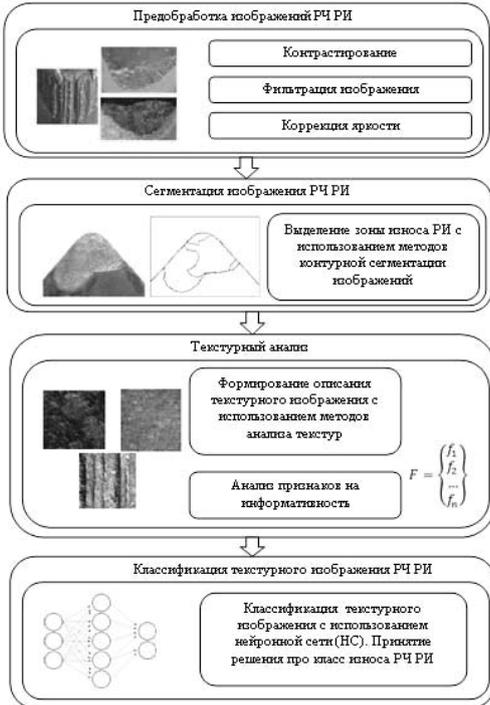


Рисунок 1 – Обобщенная схема обработки изображений активных зон РЧ РИ и классификации текстур зон износа

Целью настоящей статьи является изложение результатов нового подхода к распознаванию состояний изношенных и отказавших режущих инструментов. Он основан на использовании нового метода распознавания классов важной составляющей состояния поверхности инструмента – ее текстуры – по комплексу признаков, дополненному результатами анализа Марковских полей изображений.

Рассмотрим основные результаты разработок.

Общая структура процессов обработки изображений контактных поверхностей РЧ представлена на рис. 1.

Она включает модули предварительной обработки изображений, их сегментации (т.е. выделения на изображении информативных зон), текстурного анализа участков информативных зон, формирования вектора признаков, анализа информативности признаков, классификации класса текстуры анализируемого участка поверхности РЧ (т.е. причисления его к одному из классов текстур, предварительно сформированных). Для формирования расширенного набора признаков производились вычисления энергетических спектров Фурье [1], формирование матриц смежности [2] и вычисление Марковских полей (МП) изображений. Марковские поля обеспечивают возможность анализа локальные свойства текстурных изображений [3,4].

В качестве исходных данных использовались те же фрагменты текстурных изображений РЧ РИ, что и в работах [1, 2].

На рис. 2, 3 схематически представлены некоторые из блоков интеллектуальной системы распознавания классов текстур зон износа РЧ РИ.



Рисунок 2 – Фрагмент интеллектуальной системы распознавания классов текстур зон износа РЧ РИ

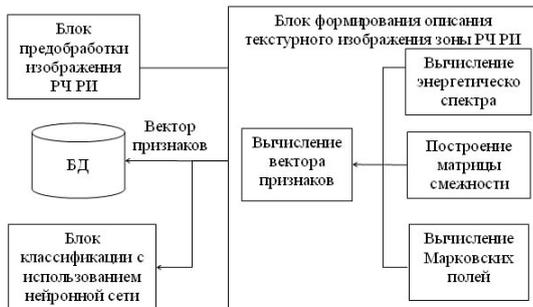


Рисунок 3 – Структурная схема блока формирования расширенного набора признаков классов текстур зон РЧ РИ.

Рассмотрим метод анализа Марковских полей изображений. Метод, основан на применении стохастической модели Марковского случайного поля [3, 4], расположенного на сетке размерностью $N \times M$ и описываемого дискретной функцией $p: p = (i, j)$, где $i \in [1, N]$, $j \in [1, M]$ – размеры изображения. Каждый пиксель изображения описывается через базовую окрестность взаимодействия – систему соседних пикселей l -го порядка. Основной структурной единицей взаимодействия в данной модели является множество соседних пикселей (далее - соседей), один из которых является анализируемым, а остальные принадлежат к его системе соседей. Различают МП 1-го, 2-го и 3-го порядка (табл. 1)

Алгоритм реализации статистического подхода к формированию описания текстурных изображений зон износа на основе вычисления МП включает следующие этапы:

Этап 1. Квантование значений интенсивности оттенков серого на анализируемом изображении зоны РЧ РИ.

Этап 2. Вычисление признаков:

- 1) определение порядка области соседей - $k = 3$;
- 2) вычисление вектора сумм соседей S в каждой области соседей 3-го порядка:

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \dots \\ S_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I(i-1, j) + I(i+1, j) \\ I(i, j-1) + I(i, j+1) \\ I(i-2, j) + I(i+2, j) \\ I(i, j-2) + I(i, j+2) \\ I(i+1, j-1) + I(i+1, j+1) \\ I(i-1, j+1) + I(i+1, j-1) \end{pmatrix}; \quad (1)$$

3) собственно вычисление вектора признаков α :

$$\begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \dots \\ \alpha_n \end{pmatrix} = \frac{\sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N I(i, j)}{\sum_{l=0}^M \sum_{m=0}^N S(l, m) \cdot S(l, m)^T}; \quad (2)$$

4) вычисление параметра σ :

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N (I(i, j) - \sum_{l=1}^n \alpha_l \cdot S_l)}{M \cdot N} \quad (3)$$

Этап 3. Формирование вектора признаков: $f = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \sigma)$.

Параметр α характеризует влияние соседних пикселей по всем направлениям на центральный пиксель, который анализируется, в частности - показывает насколько отличаются соседние пиксели от центрального пикселя. Произведение $\alpha_i \cdot S_i$ характеризует математическое ожидание интенсивности в конкретном пикселе на изображении. Параметр σ характеризует дисперсию центрального пикселя относительно его соседей.

На основе вычисленных Марковских полей 3-го порядка для участков текстур изображений различных зон РЧ получали вектор признаков текстуры. Он подлежал анализу на информативность, который осуществлялся с учетом распределения значений признаков по классам текстурных изображений износа РИ. В результате анализа выбраны наиболее информативные признаки - $\sigma, \alpha_4, \alpha_5$ (рис. 4).

Таблица 1 – Представление структур Марковских полей изображений разных порядков

Марковское поле	Структурная форма поля	Формула вычисления вектора сумм соседних элементов
1-го порядка	$\begin{matrix} & i-1, j & \\ i, j-1 & i, j & i, j+1 \\ & i+1, j & \end{matrix}$	$\begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I(i-1, j) + I(i+1, j) \\ I(i, j-1) + I(i, j+1) \\ I(i-1, j) + I(i, j+1) \\ I(i+1, j) + I(i, j-1) \end{pmatrix}$
2-го порядка	$\begin{matrix} i-1, j-1 & i-1, j & i-1, j+1 \\ i, j-1 & i, j & i, j+1 \\ i+1, j-1 & i+1, j & i+1, j+1 \end{matrix}$	$\begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I(i, j-1) + I(i, j+1) \\ I(i-1, j) + I(i+1, j) \\ I(i-1, j-1) + I(i+1, j+1) \\ I(i-1, j+1) + I(i+1, j-1) \\ I(i, j-1) + I(i, j+1) + I(i+1, j) \\ I(i, j-1) + I(i, j+1) + I(i-1, j) \\ I(i-1, j-1) + I(i-1, j+1) + I(i, j-1) \\ I(i-1, j) + I(i, j-1) + I(i, j+1) \end{pmatrix}$
3-го порядка	$\begin{matrix} & & i+2, j & & \\ & i-1, j-1 & i-1, j & i-1, j+1 & \\ i, j-2 & i, j-1 & i, j & i, j+1 & i, j+2 \\ & i+1, j-1 & i+1, j & i+1, j+1 & \\ & & i+2, j & & \end{matrix}$	$\begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I(i, j-2) + I(i, j+2) \\ I(i+2, j) + I(i-2, j) \\ I(i, j-1) + I(i, j+1) \\ I(i-1, j) + I(i+1, j) \\ I(i-1, j-1) + I(i+1, j+1) \\ I(i-1, j) + I(i+1, j-1) \end{pmatrix}$

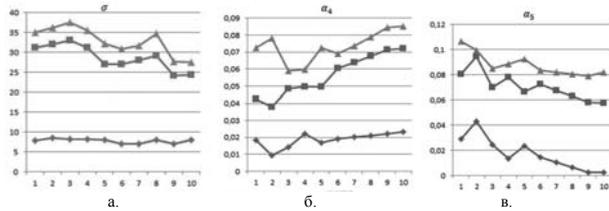


Рисунок 4 – Представление распределения значений информативных признаков текстур зон РЧ РИ, вычисленных по Марковским полям 3-го порядка (а - σ ; б - α_4 ; в - α_5). На оси абсцисс каждого графика указаны номера анализируемых фрагментов текстурных изображений РЧ).

Компьютерное моделирование статистического подхода к формированию описания текстурных изображений зон износа РИ проведено на 4-х классах текстурных изображений зон износа РЧ РИ. Достоверность распознавания оценивалась по “проценту правильного распознавания” (ППР).

Установлено, что для ряда текстурных изображений РЧ РИ распознавание классов текстур, вычисленных по Марковским полям 3-го порядка, дает лучшие результаты – в сравнении с предыдущими разработками [1, 2]. В частности, следы нарушения целостности покрытия вследствие износа РЧ распознаны со следующими результатами: для метода использования матрицы смежности ППР=80%, для метода использования Марковских полей - 95%. Реализация системы распознавания зон износа РИ выполнена в среде программирования Microsoft Visual Studio 2010, на языке программирования C#. Программа имеет удобный интерфейс (рис. 5), который позволяет загрузить текстурное изображение анализируемой зоны РЧ РИ, улучшить его качество с помощью контрастирования, фильтрации. Выбор оптимальной обучающей выборки зависит от её размера и от сложности алгоритмов распознавания [5]. Исследования позволили определить оптимальный размер обучающей выборки – 30 текстурных изображений износа РИ. С позиций быстрейшего алгоритмов - время формирования признаков Марковскими полями на 50 мс больше, чем при построении матрицы смежности (25мс).

Выводы.

Приведены некоторые из результатов разработок нового подхода к распознаванию состояний изношенных и отказавших РИ, основанного на использовании нового метода определения классов текстур контактных поверхностей РИ. Среди признаков текстур поверхностей РИ впервые использованы признаки, вычисленные по Марковским полям изображений РЧ. Проведенные исследование по выбору порядка Марковского поля изображения показали, что наилучшие результаты распознавания текстур получены при $n = 3$.



Рисунок 5 – Изображение одной из рабочих панелей программного комплекса для комплексного распознавания классов текстур инструментов

Распознавание текстур РЧ только по признакам, вычисленным по Марковским полям, повышает ППР для ряда классов текстур. Распознавание текстур РЧ по комплексу признаков, дополненному результатами анализа Марковских полей изображений, повышает ППР для всех исследованных классов текстур. Компьютерное моделирование соответствующей интеллектуальной системы подтвердило перспективность применения разработок для распознавания различных классов текстур РИ.

Список использованных источников: 1. Деревянченко А.Г. Система интеллектуального анализа изображений зон износа режущих инструментов/А.Г. Деревянченко, О.Ю. Бабилунга, Д.А. Кришныц // Резание и инструмент в технологических системах. — Харьков: НТУ “ХПИ”. 2010. — Вып. 78. — С. 34 – 41. 2. Деревянченко А.Г. Подход к распознаванию состояний поверхностей режущей части инструментов с учетом результатов анализа их текстур./А.Г. Деревянченко, О.Ю. Бабилунга, А.О.Соценко//Резание и инструмент в технологических системах. - Харьков: НТУ “ХПИ”. 2011 — Вып. 80. — С. 68 – 75. 3. Chellappa R. Model based texture segmentation and classification/ Chellappa R., Kashyap R.L.//World Scientific – Singapore, 1992 – p.277-310. 4. Kashyap R.L. Estimation and choice of neighborhoods in spatial interaction models of images, IEEE Trans. Inf. Theory, 1983, p.60-72. 5. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей / Р. Каллан. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2001.—291 с.

Поступила в редакцию 25.05.2012

УДК 621.922

Т.Г. Джугурян, д-р техн. наук, А.А. Новак, Одесса, Украина

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ РАЗМЕРНОГО ИЗНОСА РАСТОЧНОГО ИНСТРУМЕНТА ОДНОСТОРОННЕГО РЕЗАНИЯ

Запропонований метод автоматизованого контролю ефективності роботи механізму самокомпенсації зношування роточного інструменту одностороннього різання.

Предложен метод автоматизированного контроля эффективности работы механизма самокомпенсации износа расточного инструмента одностороннего резания.

The method of the automated control of overall performance of the mechanism of self-compensation of wear of the boring instrument of unilateral cutting is offered.

Одним из основных факторов влияющих на размерную точность обработки операций растачивания является износ рабочих элементов расточного инструмента одностороннего резания (РИОР).

Повышение эффективности обработки точных координированных отверстий связано с увеличением размерной стойкости инструмента на основе комплексного применения современных износостойких инструментальных материалов и механизмов самокомпенсации износа.

Для повышения размерной точности обработки отверстий РИОР предложены автономные механизмы самокомпенсации износа, основанные на кинематической связи режущего элемента и передаточного числа кинематической цепи больше единицы происходит радиальное выдвигание режущего элемента при изменении диаметра обрабатываемого отверстия. Таким образом, происходит частичная самокомпенсация износа инструмента. Непрерывно-периодическая самокомпенсация осуществляется за счет выполнения одного из трех направляющих в виде ограниченно подвижного упругого элемента и наличия компенсирующего звена в кинематической цепи. Применение механизмов непрерывно-периодической самокомпенсации износа позволяет повысить размерную стойкость комбинированных инструментов в 2 раза, гарантированно обеспечить 6 – 7 квалитет точности (в отдельных случаях IT5) растачивания отверстий диаметрами более 40 мм и относительной длиной не более 20 ($l_0/d_0 \leq 20$) в стальных и чугунных заготовках [1].

Недостатком использования РИОР с самокомпенсацией износа является то, что его предельный износ невозможно своевременно выявить на основе контроля диаметра обработанного отверстия. Следствием этого является не-

полное использование рабочих элементов РИОР, приводящее к снижению эффективности применения таких инструментов. Поэтому возникла необходимость разработки метода автоматизированного контроля размерного износа РИОР в процессе его эксплуатации.

Целью работы является повышение эффективности использования РИОР за счет автоматизированного контроля износа его рабочих элементов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- разработать метод автоматизированного контроля размерного износа РИОР;

- определить эффективность предложенного метода автоматизированного контроля размерного износа РИОР.

Схема РИОР с механизмами непрерывно-периодической самокомпенсации износа представлена на рисунке 1. Он состоит из корпуса 1, в котором установлены режущий элемент 2, направляющие 3, 4, 5 и коромысло 6. Направляющий элемент 5 выполнен в виде ограниченно подвижного упругого элемента. Оптимальное расположение рабочих элементов инструмента: $\varphi_1 = 45^\circ$, $\varphi_2 = 180^\circ$, $\varphi_3 = 230^\circ$ [1].

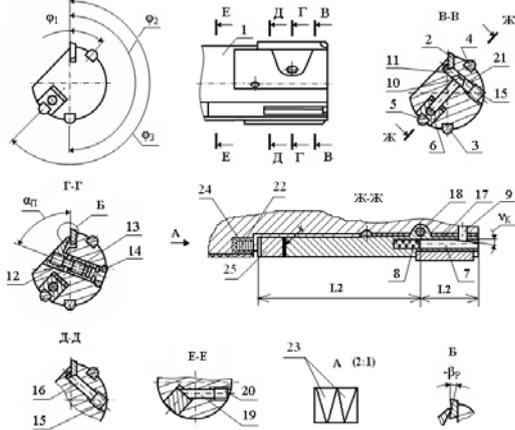


Рисунок 1 – Схема РИОР с механизмом непрерывно-периодической самокомпенсации износа

Размерная настройка режущего элемента 2, закрепленного в корпусе 1 прихватом 12, винтом 13 и упругой втулкой 14, реализуется набором толкателей 10, 11, 16, 21 и винтами 15.

Коромысло 6 установлено в корпусе 1 на упругом основании 17 из маслостойкой резины толщиной $h_{н1} = 0,5 - 2$ мм с возможностью поворота вокруг оси штифта 18. Поворот коромысла 6 ограничен упругим основанием 17 и регулируемым ограничителем 19 с винтом 20. Инструменты снабжены толкателем 9, компенсатором 7 с упругим элементом 8. Угол φ_k наклона клина компенсатора 7, взаимодействующего с наклонной торцовой поверхностью толкателя 9, выполнен в пределах $5 - 7^\circ$, что исключает осевое перемещение компенсатора 7 под действием силы резания.

Вследствие износа режущего элемента изменение диаметра обрабатываемого отверстия приводит к радиальному перемещению направляющих 3, 4 и 5 к оси инструмента, в результате чего коромысло 6 и толкатели 9, 10, 11 выдвигают элемент 2 в радиальном направлении, компенсируя его размерный износ. Увеличение диаметра обрабатываемого отверстия вследствие радиального выдвигания режущего элемента 2 позволяет коромыслу 6 под действием упругого основания 17 совершить поворот в обратном направлении, обеспечивая контакт элемента 5 с заготовкой. Образующийся зазор в кинематической цепи, связывающей элементы 2 и 5, устраняется в процессе обработки механизмами непрерывно-периодической самокомпенсации износа перемещением режущего элемента 2 в обратном направлении и компенсатором 7. Особенностью механизмов непрерывно-периодической самокомпенсации износа является периодическая поднастройка режущего элемента после вывода РИОР из обработанного отверстия. Она осуществляется вследствие перемещения элемента 5 под действием упругого основания 17 в пределах ограничителя 19 и устранения компенсатором 7 зазора, образующегося между элементами 2 и 5 [1].

Для контроля перемещений коромысла 6 РИОР используется индуктивный датчик 22 (катушка датчика) с двумя металлическими пластинами 23 (якорь датчика). Катушка датчика установлена в корпусе 1 РИОР с использованием изоляционной клеевой прокладки 24, а металлические пластинки 23 – во вставке 25 коромысла 6. Вставка 25 выполнена из диэлектрического материала. Форма пластин 23 и их количество влияет на чувствительность индуктивного датчика 22 и на характеристику $x = f(e)$ (индуктивное сопротивление в зависимости от перемещения).

Выводы катушки 22 подключены к измерительной системе (см. рис. 2), состоящей из кварцевого генератора 26, блока преобразователя 27, блока электронных фильтров 28 и системы ЧПУ 29 станка, управляющей механизмом смены РИОР 30. [2].

При перемещении коромысла 6 с металлическими пластинами 23 относительно катушки датчика 22 в процессе эксплуатации РИОР происходит изменение формы магнитного потока, создаваемого катушкой, в результате которого меняется его индуктивное сопротивление. Изменение индуктивного сопротивления датчика 22 преобразуется на входе блока преобразователя 27 в

изменение напряжения на его выходе и далее после фильтров 28 регистрируется системой ЧПУ станка [2].

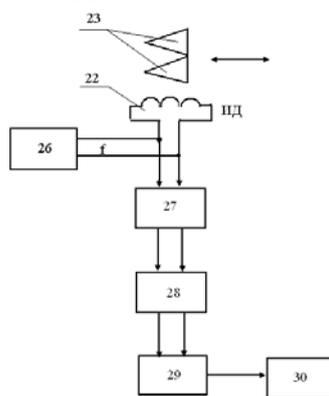


Рисунок 2 – Схема управления механизмом смены изношенного РИОР [2]

В процессе эксплуатации РИОР система ЧПУ регистрирует изменения напряжения, поступающие с датчика 22, в соответствии с графиком, представленным на рис. 3. Периодические скачки напряжения ΔU на датчике после каждого вывода РИОР из обрабатываемого отверстия определяются действием механизма непрерывно-периодической самокомпенсации износа режущего элемента. Величину скачка напряжения ΔU можно определить с помощью следующего выражения:

$$\Delta U = K_c \cdot K_L (J_H + J_P) \cdot (1 + J_H / J_P) / (0,25 + 0,75 \cdot J_H / J_P), \quad (1)$$

где

$$K_L = L_1 / L_2; \quad (2)$$

ΔU – скачок напряжения на датчике после вывода РИОР из обрабатываемого отверстия, мВ; K_c – постоянная датчика, мВ/мкм; K_L – коэффициент повышения чувствительности датчика; J_H – среднее значение радиального износа направляющих элементов, мкм; J_P – радиальный износ режущего элемента, мкм, L_1, L_2 – геометрические параметры коромысла РИОР, (см. рис. 1).

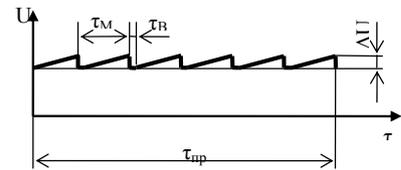


Рисунок 3 – Зависимость изменения напряжения U на датчике от времени τ эксплуатации РИОР: τ_m – время обработки заготовки; τ_b – время остановки; $\tau_{пр}$ – время эксплуатации РИОР до его полного износа

Значения параметров радиального износа режущего J_P и направляющих J_H элементов для различных сочетаний обрабатываемого и инструментального материалов можно определить с помощью литературных данных или экспериментально [1].

Количество скачков напряжения на датчике определяют суммарный размерный износ РИОР и время его эксплуатации до полного износа:

$$J_{пр} = N_L J_P; \quad (3)$$

$$\tau_{пр} = N_L (\tau_m + \tau_b), \quad (4)$$

где $J_{пр}$ – суммарный размерный износ режущего элемента время эксплуатации РИОР до его полного износа, мин; $\tau_{пр}$ – суммарное время эксплуатации РИОР до его полного износа, мин; τ_m – время обработки заготовки РИОР, мин; τ_b – время простоя между обработками заготовок РИОР, мин;

Более полное использование режущих свойств РИОР достигается при меньших значениях подналадочного перемещения режущего элемента после выводе РИОР из обработанного отверстия, то есть при более высокой чувствительности механизма самокомпенсации износа.

Чувствительность механизмов самокомпенсации износа характеризуется величиной изменения диаметра обрабатываемого отверстия, приводящей к радиальному выдвиганию режущего элемента. Эффективная работа рассматриваемых механизмов достигается при их чувствительности 4 – 8 мкм. В этом случае обеспечивается самокомпенсация износа при отсутствии скачкообразных перемещений режущего элемента в момент его выдвигания. указанной чувствительности механизма самокомпенсации износа величина перемеще-

ний коромысла в зоне металлических пластинок 23 составляет 0,02 – 0,04 мм. Величина этих перемещений зависит от соотношения геометрических параметров L_1, L_2 коромысла 6. Чем больше параметр K_s , тем выше эффективность регистрации скачков коромысла при выводе РИОР из расточенного отверстия в тех случаях, когда величина радиального износа режущего элемента после обработки одной заготовки менее 5 мкм. Важно отметить, что при таких малых величинах радиального износа режущего элемента срабатывание механизма самокомпенсации РИОР происходит только после обработки нескольких заготовок. Поэтому в этих случаях важно обеспечить более высокую чувствительность механизма самокомпенсации износа (4 – 5 мкм).

Чувствительность датчика определялась на стенде при плавном вводе вращающегося РИОР в конусообразное отверстие калибра и в условиях обработки стали 20Х с твердостью НВ до 216. Режимы обработки: скорость резания до 0,2 – 0,3 м/с; глубина резания и подача с непрерывно-периодической самокомпенсацией износа - $0,15 \cdot 10^{-3}$ м, $0,2 - 0,25 \cdot 10^{-3}$ м/об.

Установлено, что более высокие параметры чувствительности механизма самокомпенсации износа РИОР при равных условиях натяга в отверстиях калибра и заготовки достигаются в процессе резания. Это связано с влиянием неравномерной силы резания на повышение порога чувствительности механизма самокомпенсации износа.

Разработанный метод автоматизированного контроля износа режущего элемента РИОР позволяет повысить эффективность использования за счет более полного использования его режущих способностей, исключить появление брака в условиях автоматизированного производства. РИОР за счет автоматизированного контроля износа его рабочих элементов.

Список использованных источников: 1. Джусурия Т.Г. Комбинированная обработка точных координированных отверстий. - Одесса: АО БАХВА, 2003. - 108 с. 2. Расточная головка: А.с. 1386376 СССР, МКИ В23В 29/03 / Г.Д. Григорьян, Т.Г. Джусурия, Г.М. Бурбан (СССР). - №1240509 4/27; Заявлено 10.06.86; Опубл. 07.04.88, Бюл. № 13. - 4 с. 3. Активный контроль в машиностроении: Справочник / Педь Е.И., Высоцкий А.В. и др. / Под ред. Е.И. Педь. - М.: Машиностроение, 1978. - 352 с. 3.

Поступила в редколлегию 15.06.2012

Появление систем компьютерного 3D моделирования позволило конструкторам и технологам уже на стадии проектирования получать ответы на большинство вопросов, связанных с технологичностью изделий и трудоемкостью их изготовления. Использование показателя сложности позволяет решать целый ряд производственных задач, возникающих на основных этапах жизненного цикла промышленного изделия, в частности, на этапах технической и организационно-экономической подготовки производства. Во-первых, сложность изделия представляет собой неотъемлемое свойство и определяется на основе его конструкторско-технологических признаков. Во-вторых, сложность позволяет оценивать трудоемкость и затраты на изготовление в организационно-технических условиях конкретной производственной системы. Поэтому оценка степени сложности изделий, на базе рассмотрения их компьютерных 3D моделей, является актуальной задачей.

Анализ литературы

Задача определения сложности изделий рассматривается в современных научных работах. В основном исследования проведены в области определения конструктивно-технологической сложности изделия, характеризующей его неотъемлемое свойство. При оценке сложности учитывались геометрические, структурные и другие свойства изделия, а также предъявляемые к ним конструкторские и технологические требования. Сложность рассматривается как мера затрат ресурсов на реализацию различных этапов жизненного цикла машиностроительного изделия.

Для этого в работах [11, 12, 13] были разработаны специальные математические модели, общим принципом формирования которых является иерархическая декомпозиция изделия на структурные составляющие – детали, т. е. производится выделение первичных элементов изделия. Далее производится декомпозиция детали с выделением элементарных поверхностей, которые характеризуются определенной геометрической формой и технологическими параметрами, представленными в виде коэффициентов. Для каждого уровня иерархической структуры изделия применяется специально разработанная функция для определения значения показателя сложности.

Задаче разработки показателя сложности деталей посвящены работы [21, 23, 25]. Показатель структурной сложности представляет собой совокупность конструктивных и технологических параметров детали, инструментов и приспособлений. Для реальной количественной оценки сложности детали требуется наличие достаточно обширной базы данных по аналогичным деталям с целью построения определенных корреляционных зависимостей. В работах также не учитывается способ построения модели детали.

В работе [22] предложен метод оперативной оценки конструктивной и технологической сложности машиностроительной детали путем анализа ее трехмерной САД-модели. Основным достоинством предложенного метода является отсутствие необходимости в привлечении статистической информа-

В.Л. Доброскок, д-р техн. наук, Л.Н. Абдурайимов,
Ю.Б. Витязев, канд. техн. наук, Харьков, Украина

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ СЛОЖНОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИХ ТРИАНГУЛЯЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Розглянуто підхід до оцінки ступеня складності поверхонь промислових виробів на основі гауссової (повної) та середньої кривизни. В якості кількісного показника прийнято добуток інформаційної ентропії гауссової і середньої кривизни поверхні. Наведено результати тестування запропонованого підходу на основних аналітичних поверхнях і триангуляційних 3D моделях.

Рассмотрен подход к оценке степени сложности поверхностей промышленных изделий на основе гауссовой (полной) и средней кривизны. В качестве количественного показателя принято произведение информационной энтропии гауссової и средней кривизны поверхности. Приведены результаты тестирования предлагаемого подхода на основных аналитических поверхностях и триангуляционных 3D моделях.

The approach to assessing the degree of the surfaces complexity of industrial products based on the Gaussian (total) and the mean curvature. As a quantitative characteristics accepted a product of an information entropy of the Gaussian and mean surface curvature. The results of testing the proposed approach to the basic analytical surfaces and triangulated 3D models.

Постановка проблемы

В настоящее время одной из наиболее важных задач любого машиностроительного предприятия является эффективная организация производственного процесса. Рациональная организация производственного процесса невозможна без проведения тщательной технической подготовки производства. Одной из самых ответственных и трудоемких ее частей является технологическое проектирование, трудоемкость которого составляет 30-40% (от общей трудоемкости технической подготовки) в условиях мелкосерийного производства, 40-50% при серийном и 50-60% при массовом производстве [14].

Существует необходимость в разработке количественного показателя, характеризующего сложность и трудоемкость изготовления промышленного изделия. Такая необходимость в оценке сложности промышленных изделий возникает на протяжении всего цикла подготовки производства. Оценка может позволить выявить уровень технологичности изделий, учесть трудозатраты при их изготовлении и др.

Сложность и трудоемкость изготовления промышленных изделий напрямую зависят от сложности составляющих поверхностей и влияют на общую себестоимость. При выпуске машиностроительной продукции минимизация себестоимости является важным требованием обеспечения эффективности технологического процесса.

ции по аналогичным деталям. Исходные данные для выполнения анализа сложности получают из электронной модели детали, соответствующей требованиям ГОСТ 2.052-2006 [9]. Предложенная в данном методе математическая модель основана на том, что сложность отдельной поверхности детали является функцией от ряда параметров: кривизны, допустимых отклонений размеров, геометрической формы, взаимного расположения элементов и допустимой шероховатости поверхностей.

Определению сложности изделия на базе применения элементов интегральной геометрии и теории информации посвящена работа [27]. Сложность изделия рассматривается с двух различных сторон: внутренней – как сложность структуры или степени взаимозависимости между деталями (внутренняя сложность) и внешней – степень взаимодействия с описывающей изделие сферой (внешняя сложность).

Рассмотренные работы ориентированы, прежде всего, на решение технологических задач оценки сложности применительно к традиционным технологиям изготовления. Для работы с триангуляционными 3D моделями, используемыми в интегрированных генеративных технологиях (Rapid Prototyping) [7, 8], необходимо разработать количественный показатель для оценки их сложности.

Цель статьи – рассмотреть возможность разработки количественного показателя оценки сложности поверхностей промышленных изделий на базе их триангуляционных 3D моделей для использования при технологической подготовке производства на этапе предшествующем материализации.

Изложение основного материала

В настоящее время с появлением систем компьютерного 3D моделирования существенно повысилась эффективность процесса проектирования и изготовления машиностроительной продукции. Трехмерное моделирование является неотъемлемой частью современного машиностроительного производства. При переходе на 3D моделирование отпала необходимость в проектировании чертежей традиционными методами. В связи с этим время выпуска конструкторской документации существенно сократилось.

Триангуляционные модели, используемые в интегрированных генеративных технологиях, содержат описания трехмерной геометрии изделий в виде системы большого количества связанных между собой плоских треугольников. Каждый треугольник триангуляционной 3D модели определяется координатами своих вершин и характеризуется нормалью к его поверхности (направляющими косинусами). Задача разработки количественного показателя оценки сложности поверхностей изделия должна основываться на данных, содержащихся в триангуляционной 3D модели.

В качестве одного из подходов для оценки степени сложности поверхностей промышленного изделия предполагается использование информации о

кривизне его поверхностей. Как правило, поверхность промышленного изделия представляет собой совокупность элементарных аналитических поверхностей. Расчет кривизны таких элементарных гладких поверхностей является достаточно сложной задачей. Под гладкостью поверхности понимается условие существования в каждой ее точке касательной плоскости, наличие кривизны и др.

Из дифференциальной геометрии известно [5, 18], что нормальная кривизна поверхности – это величина, характеризующая отклонение поверхности в произвольном направлении от своей касательной плоскости в некоторой точке.

Рассмотрим локальный участок гладкой поверхности S (рис. 1) без учета точек, принадлежащих границе рассматриваемого участка. Возьмем точку M и рассмотрим все кривые, расположенные на этой поверхности, условно проходящие через нее. При этом все касательные, которые можно провести к этим кривым в точке M будут лежать в одной плоскости, которая вследствие этого называется касательной. Прямая, перпендикулярная касательной плоскости в точке M , называется нормалью \vec{N} к поверхности [5].

Построим плоскость P_1 , которая содержит точку M и нормаль к поверхности \vec{N} так, что пересечение этой плоскости с поверхностью S образует контур Π_1 (рис. 1). Можно определенным образом параметризовать $\Pi(S)$ так, что $\Pi(0) = M$ и $\Pi'(0) = T_1$. Кривые, получающиеся при пересечении поверхности с плоскостями, проходящими через нормаль к поверхности, называются нормальными сечениями. Нормальная кривизна $k_M(T_1)$ в направлении T_1 определяется как скалярное произведение $\Pi''(0) = k_M(T_1) \cdot \vec{N}$. Если построить плоскость P_2 , то определим новый контур Π_2 на поверхности S со своей собственной нормальной кривизной. Плоскость P_2 перпендикулярна P_1 и соответствует ее повороту вокруг вектора \vec{N} . В касательной плоскости существуют два перпендикулярных направления T_1 и T_2 (рис. 1) такие, что нормальную кривизну k_M в произвольном направлении T_φ в точке M можно представить формулой Эйлера [2, 17, 19]:

$$k_M(T_\varphi) = k_1 \cos^2 \varphi + k_2 \sin^2 \varphi, \quad (1)$$

где $k_1 = k_M(T_1)$ и $k_2 = k_M(T_2)$ – главные кривизны локального участка гладкой поверхности S в точке M ;

φ – полярный угол в касательной плоскости, отсчитываемый от одного из главных направлений до T_φ ($T_\varphi = T_1 \cos \varphi + T_2 \sin \varphi$; $-\pi \leq \varphi < \pi$).

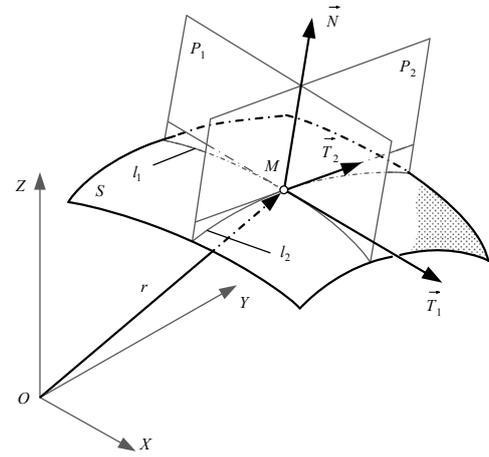


Рисунок 1 – Нормальная кривизна локального участка гладкой поверхности S в точке M : \vec{N} – нормаль к поверхности; P_1 и P_2 – плоскости, проходящие через нормаль \vec{N} и точку M ; l_1 и l_2 – нормальные сечения; \vec{T}_1 и \vec{T}_2 – главные направления

Из формулы Эйлера (1) следует, что для определения нормальной кривизны поверхности в произвольном направлении достаточно знать главные кривизны поверхности.

При этом гауссовой или полной кривизной поверхности K называется величина, определяемая произведением главных кривизн [17]:

$$K = k_1 k_2. \quad (2)$$

Из дифференциальной геометрии известно, что гауссова кривизна K является объектом внутренней геометрии поверхностей, в частности не изменяется при изометрических изгибаниях. Полная кривизна K является мерой формы локального участка поверхности S , хотя с ее использованием связана некоторая потеря информации по сравнению с использованием главных кривизн k_1 и k_2 . Потеря этой информации может быть восстановлена введением в рассмотрение средней кривизны H локального участка поверхности S в заданной точке. Средней кривизной поверхности H называется величина, определяемая соотношением [17]:

$$H = \frac{1}{2}(k_1 + k_2). \quad (3)$$

Обратный переход к k_1, k_2 определяется следующей зависимостью:

$$k_{1,2} = H \pm \sqrt{H^2 - K}. \quad (4)$$

По знакам гауссовой K и средней H кривизны, а также по соотношениям главных кривизн k_1 и k_2 , локальные участки гладких поверхностей делятся на различные типы (табл. 1). Гауссова кривизна может принимать отрицательные значения для поверхностей имеющих локальные участки седлообразной формы, т. е. главные кривизны имеют разные знаки, а, следовательно, главные сечения имеют противоположные направления выпуклости. Примерами поверхностей с отрицательной кривизной являются: однополостный гиперболоид, гиперболический параболоид, катеноид, закрытый тор и др.

Применительно к триангуляционным 3D моделям определять кривизны их поверхностей на базе применения теории классической дифференциальной геометрии не вполне корректно в силу нарушения условия гладкости их поверхностей. В последние десятилетия появилась новая область – дискретная дифференциальная геометрия, которая лежит на стыке дифференциальной и дискретной геометрии. Данная область геометрии ставит своей целью изучение геометрических объектов, которые образованы конечным числом простейших элементов, и разрабатывает дискретные аналоги понятий и методов классической дифференциальной геометрии. Дискретная дифференциальная геометрия вызывает интерес не только важными теоретическими приложениями, но и своими связями с компьютерной графикой. Важным примером этой связи служат триангуляционные поверхности [3].

Взаимосвязь дискретной и гладкой версий теории приводит к важным результатам, как в теории поверхностей, так и в теории многогранников. Классическими достижениями дискретной дифференциальной геометрии являются фундаментальные результаты А.Д. Александрова [1] и А.В. Погорелова [16] в метрической теории многогранников и выпуклых поверхностей.

Кривизна поверхности

Определению кривизны поверхности в дискретном случае посвящено достаточное количество работ как отечественных, так и зарубежных авторов. Среди них следует отметить работу [26], в которой рекомендуется использовать метод Гаусса-Бонне, обеспечивающий рациональное соотношение между точностью и скоростью вычислений.

Таблица 1 – Характеристики локальных участков гладкой поверхности S [18]

гауссова (полная) K	Кривизна		Название	Вид локального участка
	средняя H	соотношение главных кривизн k_1 и k_2		
$K > 0$	$H > 0$	$k_1 > k_2 > 0$	Выпуклый эллиптический	
		$k_1 = k_2 > 0$	Выпуклый омбилический	
	$H < 0$	$k_1 > k_2 < 0$	Вогнутый эллиптический	
		$k_1 = k_2 < 0$	Вогнутый омбилический	
$K = 0$	$H > 0$	$k_1 > k_2 = 0$	Выпуклый параболический	
	$H = 0$	$k_1 = k_2 = 0$	Уплотнения	
	$H < 0$	$k_2 < k_1 = 0$	Вогнутый параболический	
$K < 0$	$H > 0$	$k_1 > k_2; k_1 > k_2 $	Гиперболический псевдовыпуклый	
	$H = 0$	$k_1 = -k_2$	Минимальный	
	$H < 0$	$k_1 > k_2; k_1 < k_2 $	Гиперболический псевдовогнутый	

В данном подходе при определении кривизны поверхности в вершинах триангуляционной модели участвуют те ребра и треугольники, которые инцидентны рассматриваемой вершине. Для нахождения гауссовой кривизны поверхности в вершине V_k (рис. 2), необходимо определить полный угол при V_k – сумма внутренних углов φ_i для каждого треугольника F_i . При переходе от случая использования теоремы Гаусса-Бонне для гладких поверхностей [17, 19, 20] к дискретному случаю, интегральная гауссова кривизна \bar{K}_k локального участка триангуляционной поверхности при вершине V_k (рис. 2) определяется по следующему соотношению [26]:

$$\bar{K}_k = \iint_S K_k dS = 2\pi - \sum_{i=1}^{N_k} \varphi_i, \quad (5)$$

где K_k – гауссова кривизна поверхности в окрестности dS вершины V_k ;
 N_k – количество треугольников, ребра которых инцидентны вершине V_k ;
 φ_i – внутренний угол треугольника F_i при вершине V_k .

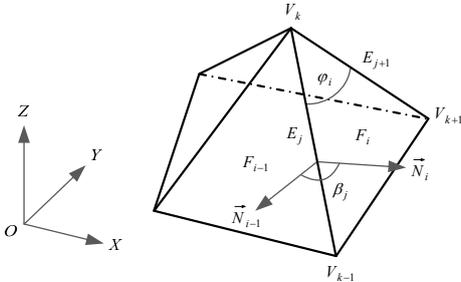


Рисунок 2 – Схема определения гауссовой (полной) и средней кривизны локального участка триангуляционной поверхности при вершине V_k ; F_{i-1} и F_{i+1} – смежные треугольники с общим ребром E_j ; φ_i – внутренний угол треугольника F_i при вершине V_k ; E_j – ребро, инцидентное вершине V_k ; β_j – двугранный угол при ребре E_j (угол между нормальными \vec{N}_{i-1} и \vec{N}_i треугольников F_{i-1} и F_i)

Аналогичным образом для определения интегральной средней кривизны \bar{H}_k локального участка триангуляционной поверхности при вершине V_k (рис. 2) используется следующее соотношение [26]:

$$\bar{H}_k = \iint_S H_k dS = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^{N_k} E_j \beta_j, \quad (6)$$

где H_k – средняя кривизна поверхности в окрестности dS вершины V_k ;
 E_j – длина общего ребра двух смежных треугольников, инцидентного вершине V_k ;
 β_j – двугранный угол при ребре E_j (угол между нормальными смежных по ребру E_j треугольников F_{i-1} и F_i).

Для получения гауссовой и средней кривизны в вершине V_k из интегральных выражений (5)-(6), предполагается, что кривизна равномерно распределена вокруг этой вершины и нормализована по области [26]:

$$K_k = \frac{\bar{K}_k}{S} = \frac{2\pi - \sum_{i=1}^{N_k} \varphi_i}{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^{N_k} S_i}, \quad (7)$$

$$H_k = \frac{\bar{H}_k}{S} = \frac{\frac{1}{4} \sum_{j=1}^{N_k} E_j \beta_j}{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^{N_k} S_i},$$

где S_i – площадь i -го треугольника F_i , стороны которого инцидентны вершине V_k .

Для нахождения полного угла при вершине V_k триангуляционной модели необходимо вычислить сумму внутренних углов треугольников φ_i . Величина угла φ_i для отдельного треугольника F_i (рис. 2) с координатами вершин $V_{k-1}(x_{k-1}; y_{k-1}; z_{k-1})$, $V_k(x_k; y_k; z_k)$ и $V_{k+1}(x_{k+1}; y_{k+1}; z_{k+1})$ может быть рассчитана по следующей зависимости [4]:

$$\varphi_i = \arccos \left(\frac{\overline{V_k V_{k-1}} \cdot \overline{V_k V_{k+1}}}{\left| \overline{V_k V_{k-1}} \right| \cdot \left| \overline{V_k V_{k+1}} \right|} \right), \quad (8)$$

где координаты векторов $\overline{V_k V_{k-1}}$ и $\overline{V_k V_{k+1}}$ определяются на базе координат вершин треугольника F_i $\overline{V_k V_{k-1}} = \{x_{k-1} - x_k; y_{k-1} - y_k; z_{k-1} - z_k\}$ и $\overline{V_k V_{k+1}} = \{x_{k+1} - x_k; y_{k+1} - y_k; z_{k+1} - z_k\}$.

Длина ребра E_j определяется как длина вектора $\overline{V_k V_{k-1}}$ (рис. 2) по следующей зависимости [4]:

$$\left| \overline{V_k V_{k-1}} \right| = \sqrt{(x_{k-1} - x_k)^2 + (y_{k-1} - y_k)^2 + (z_{k-1} - z_k)^2}. \quad (9)$$

Двугранный угол β_j при ребре E_j определяется как угол между нормальными $\vec{N}_{i-1} = \{N_{x,i-1}; N_{y,i-1}; N_{z,i-1}\}$ и $\vec{N}_i = \{N_{x,i}; N_{y,i}; N_{z,i}\}$ к треугольникам

F_{i-1} и F_i соответственно (рис. 2) и определяется следующей зависимостью [4]:

$$\beta_j = \arccos \left(\frac{\overline{N_{i-1}} \cdot \overline{N}_i}{\left| \overline{N_{i-1}} \right| \cdot \left| \overline{N}_i \right|} \right) = \arccos \left(\frac{N_{x,i-1} N_{x,i} + N_{y,i-1} N_{y,i} + N_{z,i-1} N_{z,i}}{\sqrt{N_{x,i-1}^2 + N_{y,i-1}^2 + N_{z,i-1}^2} \cdot \sqrt{N_{x,i}^2 + N_{y,i}^2 + N_{z,i}^2}} \right). \quad (10)$$

Определение площади S_i треугольника F_i с вершинами V_{k-1} , V_k и V_{k+1} производится с учетом [6, 10] по следующим зависимостям:

$$S_i = \frac{1}{2} \sqrt{S_{Minor1(i)}^2 + S_{Minor2(i)}^2 + S_{Minor3(i)}^2}, \quad (11)$$

где $S_{Minor1(i)}$, $S_{Minor2(i)}$, и $S_{Minor3(i)}$ определяются следующим образом:

$$S_{Minor1(i)} = \begin{vmatrix} y_{k,i} - y_{k-1,i} & z_{k,i} - z_{k-1,i} \\ y_{k+1,i} - y_{k-1,i} & z_{k+1,i} - z_{k-1,i} \end{vmatrix} = y_{k,i} z_{k+1,i} - y_{k+1,i} z_{k,i} - y_{k-1,i} z_{k+1,i} + y_{k-1,i} z_{k,i};$$

$$S_{Minor2(i)} = - \begin{vmatrix} x_{k,i} - x_{k-1,i} & z_{k,i} - z_{k-1,i} \\ x_{k+1,i} - x_{k-1,i} & z_{k+1,i} - z_{k-1,i} \end{vmatrix} = x_{k,i} z_{k+1,i} - x_{k+1,i} z_{k,i} - x_{k-1,i} z_{k+1,i} + x_{k-1,i} z_{k,i};$$

$$S_{Minor3(i)} = \begin{vmatrix} x_{k,i} - x_{k-1,i} & y_{k,i} - y_{k-1,i} \\ x_{k+1,i} - x_{k-1,i} & y_{k+1,i} - y_{k-1,i} \end{vmatrix} = x_{k,i} y_{k+1,i} - x_{k+1,i} y_{k,i} - x_{k-1,i} y_{k+1,i} + x_{k-1,i} y_{k,i}.$$

Полученные расчетные соотношения позволяют определять гауссову K и среднюю H кривизны локальных участков в вершинах триангуляционной поверхности.

На первоначальном этапе исследований в качестве показателя сложности поверхностей были выбраны средние значения кривизн. Однако проведенные исследования анализа триангуляционных моделей показали их слабую связь со сложностью определяемой экспертно. В процессе анализа результатов моделирования возникла рабочая гипотеза о том, что необходим обобщенный критерий оценки сложности на базе информационной энтропии значений кривизн.

Информационная энтропия кривизны

Информационные энтропии предлагается рассчитывать на основе полученных значений гауссовой K и средней H кривизны. Информационная

энтропия играет центральную роль в теории информации в качестве меры ее количества. Одна из фундаментальных работ по теории информации принадлежит К. Шеннону [24]. Определение величины информационной энтропии $I(x)$ для интервального вариационного ряда значений исследуемого признака x выполняется по следующей зависимости:

$$I(x) = -k \sum_{i=1}^m p_i \log_b(p_i), \quad (12)$$

где p_i – относительная частота исследуемого признака x ($\sum_{i=1}^m p_i = 1$);

m – количество одинаковых интервалов разбиения;

b – основание логарифма ($b \geq 2$);

k – коэффициент, определяемый из некоторых соображений (знак минус учитывает, что для случая $p_i < 1$, $\log_b(p_i) < 0$).

Количество интервалов разбиения выбирается по следующей зависимости [15]:

$$m_{\min} \dots m_{\max} = (0,55 \dots 1,25) N_{\text{vert}}^{0,4}, \quad (13)$$

где N_{vert} – общее количество вершин триангуляционной модели.

Энтропия должна быть равна 1, если значения относительных частот p_i во всех интервалах равны (равномерное распределение исследуемого признака), 0 – если $p_i = 1$ в одном интервале, а в остальных $p_i = 0$ (в нашем случае $p_i \neq 0$ для крайних интервалов).

Рассмотрим определение коэффициента k для предельного случая – равномерного распределения:

$$I(x) = -k \sum_{i=1}^m \frac{1}{m} \log_b \left(\frac{1}{m} \right) = -k \log_b \left(\frac{1}{m} \right) = 1, \quad (14)$$

тогда $k = 1 / -\log_b \left(\frac{1}{m} \right)$. Полученное выражение для k зависит от основания логарифма b и количества интервалов m . Если принять $b = m$, то k всегда будет равен 1 при любом m , а интервал возможных значений информационной энтропии $I(x)$ будет находиться в диапазоне $[0, 1]$. Дополнительно надо учесть математическую обработку значений $p_i = 0$ с при использовании логарифмирования (защитить вычислительную процедуру). Тогда окончательно имеем:

$$I(x) = - \sum_{i=1}^m [p_i \log_m(p_i), \text{ если } p_i > 0; \text{ иначе } 0]. \quad (15)$$

По полученному выражению информационной энтропии $I(x)$ были проведены тестовые расчеты для 10 аналитических поверхностей (рис. 3) и 8

триангуляционных моделей (рис. 4). В качестве исследуемых признаков при определении значений информационной энтропии $I(K)$, $I(H)$ использовались гауссова K и средняя кривизна поверхности H . Поверхности и триангуляционные модели на базе экспертных оценок расположены в порядке увеличения степени сложности (рис. 3, 4). Анализ результатов показал, что полученные оценки не являются представительными.

Поэтому для получения более представительных показателей сложности было решено использовать комплексные показатели с диапазоном возможных значений $[0, 1]$. В качестве таких комплексных показателей рассматривались полусумма информационных энтропий $I(K)$, $I(H)$ и их произведение:

$$I_1 = \frac{1}{2}(I(K) + I(H)); \quad I_2 = I(K) \cdot I(H).$$

Анализ результатов показал, что на базе тестовых поверхностей и моделей (рис. 3, 4) использование комплексного показателя I_2 позволяет добиться лучших результатов по сравнению с I_1 . Поэтому в качестве показателя сложности целесообразно использовать I_2 , определяемого как произведение информационных энтропий гауссовой и средней кривизны поверхности.

Выводы

Рассмотрена возможность разработки количественного показателя оценки сложности поверхностей промышленных изделий на базе их триангуляционных 3D моделей для использования при технологической подготовке производства на этапе предшествующем материализации.

Предложен количественный показатель и расчетные зависимости для оценки сложности поверхностей промышленных изделий. В качестве показателя сложности рекомендуется использовать произведение информационных энтропий гауссовой и средней кривизны поверхностей.

Информационно-статистический подход к оценке степени сложности поверхностей промышленных изделий на базе анализа их триангуляционных 3D моделей создает предпосылки к дальнейшей их классификации и повышению уровня подготовки специалистов предметной области интегрированных генеративных технологий.

Результаты работы могут быть использованы при технологической подготовке производства сложных изделий на этапе предшествующем материализации.

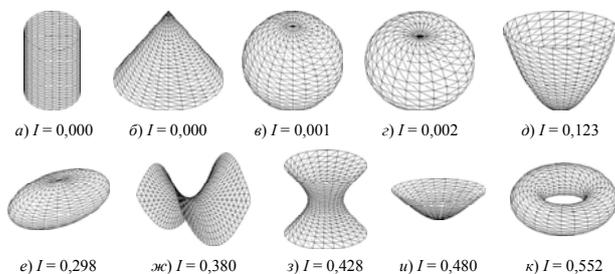


Рисунок 3 – Основные аналитические поверхности, расположенные в порядке увеличения величины сложности, определяемой на базе информационной энтропии I : а – цилиндрическая; б – коническая; е – сферическая; з – тор закрытый ($r < R$); д – эллиптический параболоид; е – эллипсоид; ж – гиперболический параболоид; з – однополостный гиперболюид; и – двуполостный гиперболюид (часть); к – тор открытый ($r > R$)

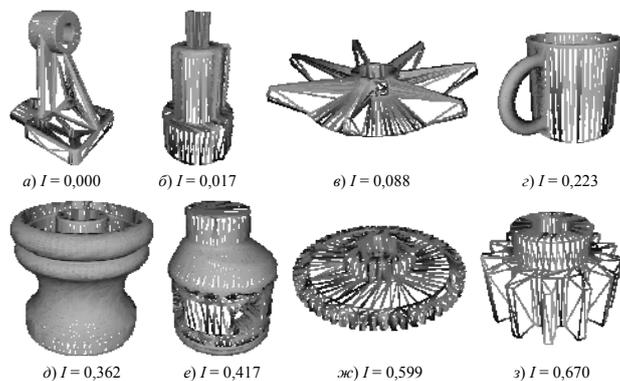


Рисунок 4 – Тестовые триангуляционные 3D модели изделий, расположенные в порядке увеличения величины сложности, определяемой на базе информационной энтропии I : а – кронштейн; б – корпус детали; в – винт; г – кружка; д – корпус соединительного устройства; е – хвостовая часть детали; ж – центральная шестерня; з – ходова шестерня

Разработанный подход к оценке степени сложности поверхностей промышленных изделий на базе анализа их триангуляционных 3D моделей вошел составной частью в систему морфологического анализа, разрабатываемую на кафедре «Интегрированные технологии машиностроения» им. М.Ф.Семко Национального технического университета «Харьковский политехнический институт».

Список использованных источников: 1. Александров А.Д. Выпуклые многогранники / Александров А.Д. – М.: Гостехиздат, 1950. – 428 с. 2. Бакельман И.Я. Введение в дифференциальную геометрию «в целом» // И.Я. Бакельман, А.Л. Вернер, Б.Е. Кантор. – М.: Наука, 1973. – 440 с. 3. Бобенко А.И. О принципах дискретизации дифференциальной геометрии. Геометрия сфер / А.И. Бобенко, Ю.Б. Суриц // Успехи математических наук. – 2007. – Т. 62, Вып. 1. – С. 3-50. 4. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике / М.Я. Выгодский. – М.: АСТ: Астрель, 2006. – 991 с. 5. Гильберт Д. Наглядная геометрия / Д. Гильберт, С. Кон-Фоссен; пер. с нем. – М.: ОНТИ НТКП СССР, 1936. – 302 с. 6. Доброскок В.Л. Интегральные характеристики триангуляционных 3D моделей изделий / В.Л. Доброскок, Л.Н. Абдураимов, С.И. Чернышов // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2011. – Вып. 80. – С. 92-101. 7. Интегрированные генеративные технологии : учеб. пособие [для студ. высш. учеб. заведений] / [Грабченко А.И., Вуков Ю.Н., Доброскок В.Л. и др.]; под ред. А.И. Грабченко. – Х.: НТУ «ХПИ», 2011. – 416 с. 8. Интегрированные технологии ускоренного прототипирования и изготовления : монография / [Товажнянский Л.Л., Грабченко А.И., Чернышов С.И. и др.]; под ред. Л.Л. Товажнянского, А.И. Грабченко. – [2-е изд.]. – Харьков: ОАО «Модель Вселенной», 2005. – 224 с. 9. Единая система конструкторской документации. Электронная модель изделия. Общие положения: ГОСТ 2.052-2006. – [Действ. с 2006-09-01]. – Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2006. – 14 с. 10. Корн Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1977. – 832 с. 11. Коршунов А.И. Введение в теорию конструктивно-технологической сложности изделий машиностроения / Коршунов А.И. // Современные наукоемкие технологии. – 2004. – № 2. – С. 66-67. 12. Коршунов А.И. Исследование конструктивно-технологической сложности машиностроительного изделия / Коршунов А.И. // Фундаментальные исследования. – 2006. – № 11. – С. 36-37. 13. Коршунов А.И. Создание автоматизированных систем управления машиностроительными производствами на основе теории конструктивно-технологической сложности : автореф. дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук : спец. 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (машиностроение)» / А.И. Коршунов. – Ижевск, 2008. – 44 с. 14. Маталин А.А. Технология машиностроения: Учебник / Маталин А.А. – [2-е изд.]. – СПб.: Изд-во «Лань», 2008. – 512 с. 15. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с. 16. Погорелов А.В. Внешняя геометрия выпуклых поверхностей / Погорелов А.В. – М.: Наука, 1969. – 760 с. 17. Погорелов А.В. Дифференциальная геометрия / Погорелов А.В. – [6-е изд.]. – М.: Изд-во «Наука», 1974. – 176 с. 18. Радзевич С.П. Формообразование поверхностей деталей. Основы теории / Радзевич С.П. – К.: Растан, 2001. – 592 с. 19. Раивеский П.К. Курс дифференциальной геометрии / Раивеский П.К. – [3-е изд.]. – М.: Гос. изд-во тех.-теор. лит., 1950. – 428 с. 20. Степанов С.Е. Теорема Гаусса-Бонне / С.Е. Степанов // Сорский образ. журнал. – 2000. – Т. 6, № 9. – С. 116-121. 21. Теория сложности: монография / [Шарин Ю.С., Якимович Б.А., Толмачев В.Г., Коршунов А.И.]. – Ижевск: Изд-во ИЖГТУ, 1999. – 132 с. 22. Троицкий Д.И. Количественная оценка сложности машиностроительных деталей / Троицкий Д.И. // Оборудование и инструмент для профессионалов. – 2011. – № 3. – С. 62-65. 23. Шарин Ю.С. Теория сложности и ее использование в машиностроении / Ю.С. Шарин, Т.Ю. Поморцева. – Екатеринбург: ЦНТИ, 1996. – 237 с. 24. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике / К. Шеннон. М.: Изд-во ин. лит-ры, 1963. – 829 с. 25. Якимович Б.А. Теоретические основы конструктивно-технологической сложности изделий и структур стратегий производственных систем машиностроения: монография / Якимович Б.А., Коршунов А.И., Кузнецов А.П. – Ижевск: Изд-во ИЖГТУ, 2007. – 280 с. 26. Magid E. A comparison of Gaussian and mean curvature estimation methods on triangular meshes of range image data / E. Magid, O. Soldea, E. Rivlin // J. of Computer Vision and Image Understanding – 2007. – Vol. 107. – Iss. 3. – P. 139-159. 27. Rigau J. Shape complexity based on mutual information / J. Rigau, M. Feixas, M. Sbert // Proceeding of SMF2005. – 2005. – P. 357-362.

Поступила в редакцию 25.04.2012

УДК621.822.5:677.494.743.41

Е.Н. Еремин, д-р техн. наук, Д.А. Негров, канд. техн. наук, Губин Д.С., Омск, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПРЕССОВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

У статті розглядається вплив параметрів ультразвукового пресування на механічні та триботехнічні властивості композиційних матеріалів на основі політетрафторетилену і розробці на цій основі технології виготовлення підшипників ковзання.

В статті розглядається вплив параметрів ультразвукового пресування на механічні та триботехнічні властивості композиційних матеріалів на основі політетрафторетилену і розробка на цій основі технології виготовлення підшипників ковзання.

In article it is considered influences of parameters of ultrasonic pressing on mechanical and tribotechnical properties of composite materials on a basis PTF and development on this basis of manufacturing techniques of bearings of sliding.

В настоящее время детали узлов трения, изготовленные из различных металлов и сплавов, постепенно заменяются полимерами и полимерными композиционными материалами, в частности на основе политетрафторэтилена [1]. Это позволяет понизить себестоимость изделий, повысить их надежность и долговечность. В тоже время область применения этих материалов очень ограничена, поскольку они обладают недостаточно высоким пределом прочности и модулем упругости, что приводит к значительному деформированию поверхностных слоев при трении и интенсивному изнашиванию.

Существующие способы повышения механических и триботехнических свойств, политетрафторэтилена, такие как, введение модификаторов в полимерную матрицу и изменение режимов технологических операций (измельчение и перемешивание компонентов, прессование, термообработка) позволяют частично решить эту проблему [2].

Для более эффективного решения этой задачи необходимо применение новых методов и технологических способов, которые бы позволили существенно повысить механические и триботехнические свойства полимеров, и тем самым расширить область их применения в производстве. Поэтому данная работа, посвященная совершенствованию технологии изготовления подшипников скольжения из композиционных материалов на основе политетрафторэтилена, является актуальной.

Основой технологии, используемой при производстве изделий из полимерных композиционных материалов, является прессование из порошков заготовок и их последующее спекание. При прессовании фактически закладываются будущие свойства изделий – плотность, прочность, упругость, из-

носостойкость и равномерное распределение этих характеристик по всему объему изделия.

Для повышения качества прессования получили применение способы уплотнения порошков с наложением вибрации. Под действием вибрации силы трения и сцепления частиц уменьшаются. При этом повышаются: текучесть порошков, равномерность укладки частиц полимера, разрушаются арочные структуры.

Перспективным способом вибрационного воздействия является наложение ультразвуковых колебаний на прессуемый материал, благодаря которым существенно облегчается возникновение и развитие пластической деформации частиц порошка. Это положительно влияет и на характер изменения сил трения от давления прессования, дает возможность формировать изделие сложной формы при сравнительно небольших усилиях. Прессование с применением ультразвуковых колебаний является активным технологическим приемом, повышающим эффективность модификации структуры матрицы и оказывающим существенное влияние на процессы структурообразования в ней [3, 4].

Целью данной работы является исследование влияния параметров ультразвукового прессования на механические и триботехнические свойства композиционных материалов на основе политетрафторэтилена и разработка на этой основе технологии изготовления подшипников скольжения.

Объектом исследования являлся композиционный материал на основе политетрафторэтилена с комплексным наполнителем-модификатором: 8% - скрытокристаллический графит; 6% - углеродное волокно; 2% - MoS_2 .

Методика исследования включала два этапа. На первом этапе определялись основные технологические параметры ультразвукового прессования (амплитуда колебаний волновода-пуансона, время и усилие прессования), а также влияние этих параметров на механические свойства (предел прочности и модуль упругости) композиционного материала. Механические свойства образцов при растяжении определяли на разрывной машине Р 0,5 со скоростью деформации 20 мм/мин.

На втором этапе методикой предусматривалось исследование влияния режимов ультразвукового прессования на триботехнические характеристики (скорость изнашивания, коэффициент и момент трения) исследуемого материала.

Для изготовления изделий из полимерных композиционных материалов, методом ультразвукового прессования, была собрана специальная установка на базе гидравлического пресса МТ – 50 (рисунок 1). Применен ультразвуковой генератор УЗГ 3 – 4, имеющий выходную мощность 5 кВт и работающий в частотном диапазоне от 17,5 до 23 КГц. В качестве источника ультразвуковых колебаний был взят магнитострикционный преобразователь ПМС 15-А-18, с резонансной частотой колебаний 17,8 кГц.

Перед прессованием проводится смешивание порошков полимерного композиционного материала в смесителе с частотой вращения ножей не менее 2800 мин⁻¹, с последующим засыпанием его в закрытую пресс-форму 3, закрепленную на шаровой опоре 2. Ультразвук включали одновременно с касанием волновода-пуансона 4 поверхности порошка. При этом ультразвуковые колебания передавались пресс-форме и всей массе порошка. Под действием колебаний пуансона частицы порошка совершают также колебательные движения, при этом происходит перемещение и укладка частиц. Мелкие частицы распределяются и заклиниваются между крупными, что способствует уплотнению и укрупнению контактов между частицами.

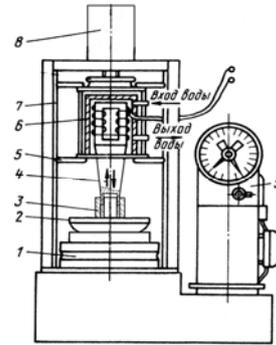


Рисунок 1 – Схема установки для прессования изделий из политетрафторэтилена с наложением ультразвуковых колебаний:
1 – основание; 2 – шаровая опора; 3 – пресс-форма; 4 – волновод-пуансон; 5 – траверса; 6 – магнитострикционный преобразователь; 7 – направляющая колонна; 8 – гидроцилиндр; 9 – гидравлическая система

После ультразвукового прессования отпрессованную заготовку подвергают спеканию, технология которой включает в себя следующие этапы: 1 – нагрев до температуры 360 ± 5 °С со скоростью 1,5 – 2,0 °С/мин; 2 – выдержка при этой температуре (8 – 9 мин на 1мм толщины стенки изделия); 3 – охлаждение до температуры 327 °С со скоростью 0,3 – 0,4 °С/мин; 4 – охлаждение от 327 °С до комнатной температуры вместе с печью.

Соблюдая те же режимы спекания, для сравнения, изготавливали образцы без воздействия ультразвуковых колебаний на прессуемый композиционный материал

Анализ экспериментов показал, что влияние амплитуды колебаний волновода-пуансона на предел прочности композиционного материала носит ярко выраженный экстремальный характер с максимумом 15 мкм (рисунок 2). При этом усилие прессования составляло 65 МПа, а время прессования 90 секунд.

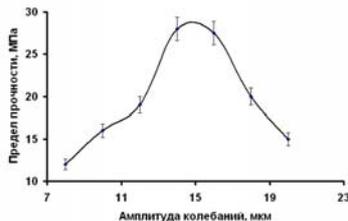


Рисунок 2 – Зависимость предела прочности полимерного композиционного материала от амплитуды колебания волновода-пуансона

Результаты исследований зависимости предела прочности от времени прессования показали, что оптимальное время прессования составляет 90 секунд (рисунки 3, 4). При этом у образцов изготовленных методом ультразвукового прессования предел прочности выше на 15%, а модуль упругости на 23%, по сравнению с образцами, изготовленными по технологии без применения ультразвука. Дальнейшее увеличение времени прессования не приводит к изменению предела прочности и модуля упругости.

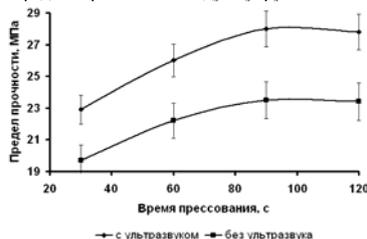


Рисунок 3 – Зависимость предела прочности от времени прессования

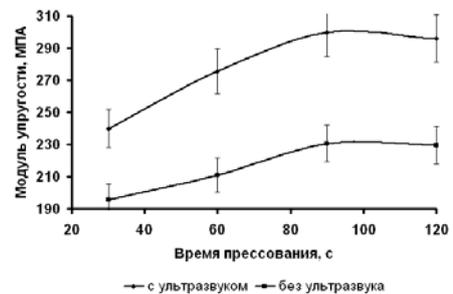


Рисунок 4 – Зависимость модуля упругости от времени прессования

Зависимости предела прочности и модуля упругости от усилия прессования показаны на рисунках 5, 6. Как видно, графики зависимостей имеют экстремальный характер с максимумом при усилии 65 МПа. При этом образцы, изготовленные методом ультразвукового прессования, имеют больший предел прочности и модуль упругости.

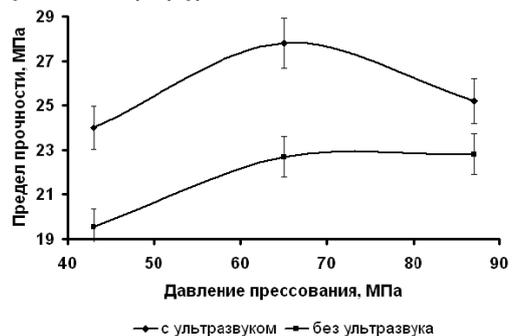


Рисунок 5 – Зависимость предела прочности от давления прессования

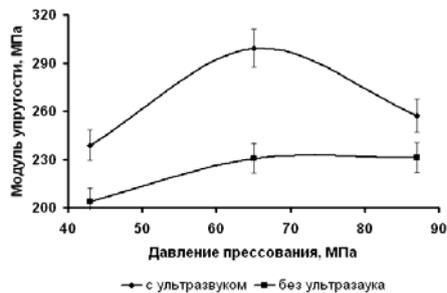


Рисунок 6 – Зависимость модуля упругости от усилия прессования

Механические испытания при повышенных температурах показали, что у образцов изготовленных ультразвуковым прессованием предел прочности практически не изменяется до 80 °С, а от 80 °С до 110 °С изменяется на 15 % (рисунок 7). Предел прочности образцов, изготовленных без ультразвука, с повышением температуры монотонно уменьшается и при 110 °С изменяется на 30 %.

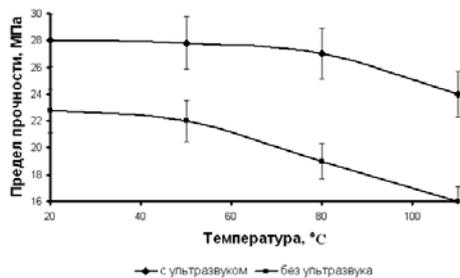


Рисунок 7 – Зависимость предела прочности от температуры

Образцы для триботехнических испытаний были изготовлены методом ультразвукового прессования, на режимах обоснованных полученными результатами первого этапа исследования (амплитуда колебаний волновода пуансона 15 мкм, усилие прессования 65 МПа, время прессования 90 секунд).

Испытания образцов проводили на специальном стенде МДС – 2, скорость скольжения составляла $V=0,75$ м/с, при давлении $P=2$ МПа без смазки.

Результаты триботехнических испытаний приведены на рисунке 8.

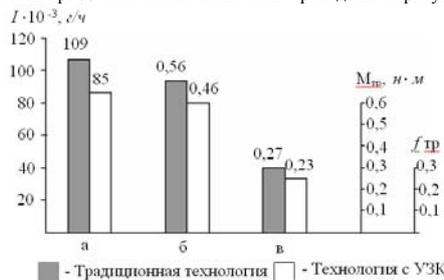


Рисунок 8 – Характеристики триботехнических свойств ПКМ:

1 – скорость изнашивания, I ; 2 – момент трения, $M_{тр}$; 3 – коэффициент трения, $f_{тр}$

В результате проведенных исследований установлено, что применение ультразвукового прессования, в технологии производства подшипников скольжения (время прессования – 90 секунд, усилие прессования – 65 МПа, амплитуда колебаний волновода пуансона – 15 мкм), позволяет повысить предел прочности на 15%, модуль упругости на 23%, при этом скорость изнашивания снижается на 23%, а коэффициент трения на 15%.

Список использованных источников: 1. Ю. К. Машков Трибофизика и свойства наполненного фторопласта: Науч. издание. Омск: Изд-во ОмГТУ, 1997. 192 с.; 2. А. А. Охлопкова Модификация полимеров ультрадисперсными соединениями / Охлопкова А. А., Андрианова О. А. и др. // Якутск : ЯФ изд-ва СО РАН, 2003. – 240 с.; 3. Д.А. Негров Исследование влияния ультразвуковых колебаний на структуру и механические свойства полимерного композиционного материала / Негров Д.А., Еремин Е.Н. // Омский научный вестник. – 2011. – №2(100). – С. 17-20.; 4. Д.А. Негров Исследование процесса ультразвукового прессования композиционного материала на основе политетрафторэтилена / Негров Д.А., Еремин Е.Н. // Омский научный вестник. – 2010. – №2(90). – С. 9-11.

Поступила в редакцию 12.05.2012

УДК 669.046.516:621.791.793

Е.Н. Еремин, д-р техн. наук, В.В. Шалай, д-р техн. наук, Ю.О. Филиппов, В.К. Сумлининов, Омск, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКЕ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

Запропоновано для виготовлення кільцевих заготовок, що використовуються в авіаційному двигунобудуванні, застосовувати електрошлакове зварювання комбінованим електродом з модифікацією металу шва дисперсними частинками карбонітрида титану. Наведено результати досліджень металу шва при зварюванні сплаву ХН77ТЮР. Показані переваги нової технології зварювання.

Предложено для изготовления кольцевых заготовок, используемых в авиационном двигателестроении, применять электрошлаковую сварку комбинированным электродом с модифицированием металла шва дисперсными частицами карбонитрида титана. Приведены результаты исследований металла шва при сварке сплава ХН77ТЮР. Показаны преимущества новой технологии сварки.

It is offered for manufacturing of the ring preparations used in aviation engine-building, to apply electroslag welding by the combined electrode with modifying of metal of a seam by disperse particles of the carbonitrid titan. Results of researches of metal of a seam are given when welding alloy ХН77ТЮР. Advantages of new technology of welding are shown.

Изделия ответственного назначения, изготавливаемые из жаропрочных сплавов, широко применяются в авиационном двигателестроении. Производство заготовок таких изделий в сварном варианте позволяет существенно повысить коэффициент использования дорогостоящих сплавов (КИМ). Однако такие сплавы обладают низкой свариваемостью и поэтому заготовки изготавливаются большей частью различными методами горячего передела –ковки, прошивки, раскатки, что обуславливает высокую трудоемкость их получения и низкий КИМ. Применение таких технологических процессов является вынужденным решением, к которому прибегают из-за низкого качества сварных соединений. Поэтому изыскание технологии изготовления таких заготовок в сварном варианте является весьма актуальной задачей.

В этом отношении перспективно применение электрошлакового способа, обеспечивающего однопроходную сварку конструкций различной толщины. Однако широко зарекомендовавшие себя способы электрошлаковой сварки пластинчатым, проволочным и пластинчато-проволочным электродами не всегда обеспечивают необходимое качество сварных соединений из жаропрочных никелевых сплавов. В первую очередь, это связано с образованием в сварных соединениях специфических дефектов – непроваров, подрезов, усадочных раковин. Для их устранения значительно завышают размеры прибылей, что не решает задачи в целом и к тому же приводит к увеличению расхода электрод-

ного металла и существенному повышению затрат на последующее механическое снятие излишка металла шва из труднообрабатываемых сплавов.

С целью устранения отмеченных недостатков использовали электрошлаковую сварку комбинированным электродом, осуществляемую одновременным вводом в шлаковую ванну неплавящегося и плавящегося электродов (рисунок 1) с устройствами сигнализации оплавления корня шва и вывода усадочной раковины на специализированной установке, созданной на базе унифицированных узлов электрошлаковых аппаратов А-612 и А-433Р и источника питания ТШС-3000 [1, 2].

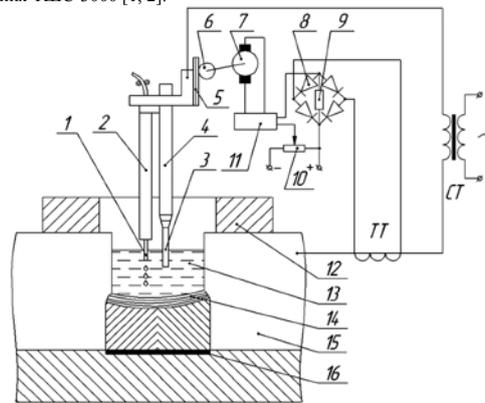


Рисунок 1 – Схема сварки комбинированным электродом: 1 – проволока; 2 – направляющий канал; 3 – неплавящийся электрод; 4 – мундштук; 5 – рейка; 6 – зубчатое колесо; 7 – электродвигатель; 8 – выпрямитель; 9 – сопротивление; 10 – потенциометр; 11 – усилитель; 12 – формирующая накладка; 13 – шлаковая ванна; 14 – металлическая ванна; 15 – свариваемые кромки; 16 – заправка

Отработка технологии электрошлаковой сварки комбинированным электродом проводилась на образцах из сплава ЭИ-437БУВД (ХН77ТЮР) толщиной 22-43 мм. В качестве неплавящегося электрода использовался вольфрамовый пруток диаметром 10 мм. Плавящимся электродом служила проволока ЭП-533 диаметром 3 мм.

Основной трудностью сварки жаропрочных никелевых сплавов являются низкие механические свойства металла шва и его жаропрочность. В связи с этим провели исследование качества сварных соединений с помощью металлографии, механических испытаний и испытаний на жаропрочность. Образцы

проходили термическую обработку в соответствии с ТУ на основной металл: закалка 1080 °С – 8 часов, охлаждение на воздухе, старение 700 °С – 16 часов, охлаждение на воздухе. Результаты испытаний показали, что свойства металла шва, полученного с применением проволоки ЭП-533, не удовлетворяют требованиям технических условий по всем показателям. Низка также и жаропрочность швов при температуре 750 °С и нагрузке 350 МПа, которая составляет 60-70 % от требуемой.

Как показано авторами ряда работ [3, 4] наиболее целесообразно использовать при сварке металлургические пути повышения свойств сварных соединений. К основному металлургическому приему следует отнести подавление столбчатого характера кристаллизации и измельчение кристаллической структуры путем легирования элементами – модификаторами [5, 6]. Кроме того, в случае образования равноосной структуры шва появляется возможность увеличения скорости сварки при неизменной погонной энергии [7].

В связи с этим для повышения свойств металла шва было применено модифицирование металлической ванны дисперсными инокуляторами [8]. Применили модификатор, в состав которого входят дисперсные частицы карбонитрида титана (0,04 %) [9]. Введение компонентов осуществляли переплавом дополнительного трубчатого электрода на никелевой основе, внутренняя полость которого заполнялась порошкообразным модификатором. Результаты испытаний образцов из сплава ХН77ТЮР представлены в таблице.

Таблица – Результаты испытаний сплава

Объект исследований	$\sigma_{вз}$, МПа	$\sigma_{ж}$, МПа	δ , %	КСУ, МДж/м ²	T_{350}^{750} , час
Немодифиц. шов	830–856 843	676–689 684	9,2–9,8 9,6	0,22–0,29 0,26	31–42 36
Модифицир. шов	982–1012 996	756–769 762	19,2–19,7 19,4	0,78–0,85 0,81	92–98 94
Требования ТУ	≥ 950	≥ 650	≥ 12	≥ 0,3	≥ 50

Металлографически исследовали место разрушения, величину зерна, распределение неметаллических включений и характер выделения упрочняющих фаз. Исследования макроструктуры показывают, что разрушение всех образцов носит межзеренный характер. Макроструктура немодифицированного шва характеризуется развитой транскристаллизацией от зоны сплавления к оси (рисунок 2, а). В средней части шва наблюдается область встречи двух кристаллизующихся фронтов. Столбчатые кристаллы имеют радиально-осевое направление с небольшим углом наклона. Рельеф поверхности излома металла шва имеет блестящий камневидный вид без зон долома, что характеризует излом как хрупкий (рисунок 3, а).

117

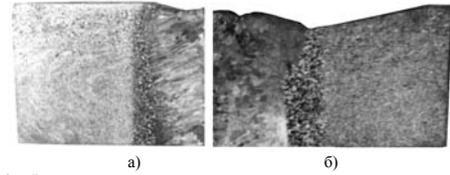


Рисунок 2 – Фрагменты макроструктуры сварных соединений, полученных ЭШС: а – без модифицирования; б – с модифицированием

При изучении мест разрушения образцов из немодифицированного металла шва после длительных жаропрочных испытаний, установлено, что оно всегда происходит в зоне направленной кристаллизации. Особенно низка жаропрочность металла шва, у которого границы кристаллитов расположены перпендикулярно, либо под небольшим углом к действию главных напряжений (рисунок 3, б).

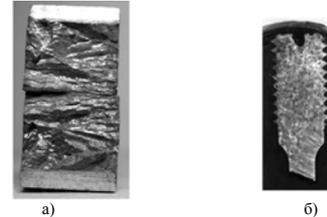


Рисунок 3. Характер разрушения образцов немодифицированного металла шва после испытаний на ударную вязкость (а) и жаропрочность (б)

Это можно объяснить тем, что важными факторами, определяющими качество и служебные свойства жаропрочных сплавов, являются фазовый состав, состояние границ зерен, их величина, степень однородности и морфология и топография включений [8, 10].

В макроструктуре модифицированного шва имеют место зерна, границы которых в основном приблизительно одинаково удалены от центра (рисунок 2, б). Размер зерна при этом уменьшается до 1,0-2,0 мм. Дефектов металла шва на всех шлифах не обнаружено. Модифицирование металла шва приводит к существенному изменению макрорельефа изломов ударных образцов, в которых появляются боковые зоны и зоны долома, а поверхность становится мелкозернистой и матовой (рисунок 4, а).

118

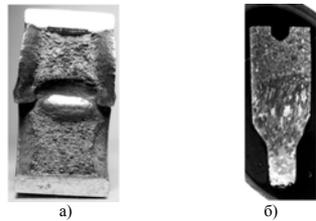


Рисунок 4 – Характер разрушения образцов модифицированного металла шва после испытаний на ударную вязкость (а) и жаропрочность (б)

Разрушение образцов во время длительных жаропрочных испытаний происходит в зоне равноосных относительно мелких зерен (рисунок 4, б). Образование такой структуры, устраняющей зону «слабины» по оси шва, приводит к повышению технологической прочности, что позволяет в свою очередь вдвое повысить скорость сварки.

Микроструктура немодифицированного металла шва характеризуется наличием большого количества строчечных карбидов, иногда игольчатой формы, боридных эвтектических фаз на границах и значительным количеством мелких неметаллических включений вблизи границ (рисунок 5, а).

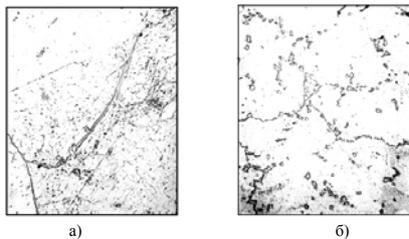


Рисунок 5 – Микроструктура металла шва: а – без модифицирования (×240); б – с модифицированием (×520)

Боридные эвтектики, имея относительно низкую температуру плавления, способствуют появлению кристаллизационных трещин при сварке.

Изучение микроструктуры металла модифицированного шва (рисунок 5, б) показывает, что карбиды в этом случае скоагулированы, они имеют компактную округлую форму, расположены большей частью на границах зерен, что по-видимому и упрочняет их, обуславливая повышенную жаропрочность такого металла. Количество неметаллических включений в этом случае незначительно. Структура околошовной зоны аналогична предыдущему слу-

119

чаю, но вследствие более высокой скорости сварки имеет меньший размер зерна, что несколько повышает свойства сварного соединения в целом.

Изучение γ' -фазы (рисунок 6) показывает, что образующиеся при распаде твердого раствора выделения упрочняющей фазы уже в литом состоянии являются достаточно мелкими и равномерно распределенными для модифицированного металла шва, кристаллизующегося при относительно высоких скоростях.

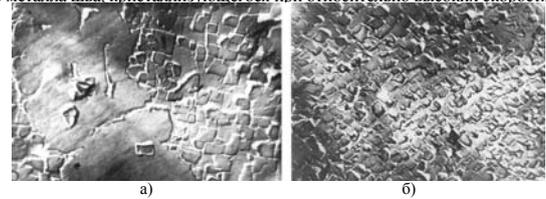


Рисунок 6 – Строение γ' -фазы в швах (×8000): а – без модифицирования; б – с модифицированием

В структуре немодифицированного шва наблюдаются обширные выделения вторичных фаз, занимающих значительную часть γ -матрицы, вследствие чего количество γ' -фазы существенно меньше.

Применение разработанной технологии сварки позволяет существенно экономить материальные и денежные ресурсы за счет повышения качества и увеличения весовой точности кольцевых заготовок из жаропрочных сплавов в авиационном двигателестроении.

Список использованных источников: 1. Еремин Е.Н. Применение комбинированного электрода при электрошлаковой сварке материалов малых толщин // Автоматическая сварка. – 2005. – № 12. – С. 54-56. 2. Еремин Е.Н. Устройство для формирования шва при электрошлаковой сварке // Автоматическая сварка. – 2005. – № 9. – С. 50-51. 3. Хильшин Ф.Ф. Жаропрочные стали и сплавы. – М.: Металлургия, 1969. – 752 с. 4. Шоршоров М.Х. Горячие трещины при сварке жаропрочных сплавов. – М.: Машиностроение, 1973. – 224 с. 5. Землин В.Н. Жаропрочность сварных соединений. – Л.: Машиностроение, 1972. – 272 с. 6. Башин Ю.А., Исакова В.Н., Масленкова Е.А. Влияние переплавных процессов на структуру и свойства сталей. – М.: Металлургия, 1991. – 240 с. 7. Дудо Д.А., Сидорук В.С., Тяун-Белоз Г.С. Пути снижения тепловложения в свариваемый металл при электрошлаковой сварке толстостенных конструкций // Автоматическая сварка. – 1982. – №10. – С. 48-50. 8. Сабуров В.П. Упрочняющее модифицирование стали и сплавов // Литейное производство. – 1998. – № 9. – С. 7-8. 9. Еремин Е.Н. Применение электрошлакового переплава для регенерации отходов жаропрочных сплавов // Современная электрометаллургия. – 2005. – №2. – С. 23-27. 10. Лозунов А.В., Петрушин Н.В. и др. Прогнозирование влияния структурных факторов на механические свойства жаропрочных сплавов // МитОМ. – 1981. – № 6. – С. 16-20.

Поступила в редакцию 15.06.2012

120

Н.Ю. Калиниченко, С.Е. Маркович, С.А. Калиниченко, Харьков, Украина

АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ СОВРЕМЕННЫХ СОТС И НАНОМАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ПРОЦЕССЕ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИХ ПРИМЕНЕНИЮ В ТЕХНОЛОГИИ ПЛАНЕТАРНОГО ШЛИФОВАНИЯ

В роботі проводиться огляд сучасних тенденцій застосування змащувально-охолоджувальних технологічних рідин (ЗОТР) з додаванням деяких домішок і наномодифікаторів при обробці деталей авіаційних двигунів із важко оброблювальних матеріалів. Наведені практичні результати застосування модифікованих ЗОТР, проведено опис механізму структуризації, а також обладнання для підготовки, активації і подачі ЗОТР у зону різання.

Ключові слова: змащувально-охолоджувальна технологічна рідина (ЗОТР), поверхнево-активна речовина (ПАВ), наночастка, присадка, планетарне шліфування, глибоке шліфування, абразивна обробка

В работе проводится обзор современных тенденций применения смазывающе-охлаждающих технологических средств (СОТС) с добавлением различных добавок и наномодификаторов при обработке деталей авиационных двигателей из труднообрабатываемых материалов. Представлены практические результаты применения модифицированных СОТС, описан механизм структуризации, а так же оборудование для подготовки, активации и подачи СОТС в зону резания.

Ключевые слова: смазочно-охлаждающие технологические средства (СОТС), поверхностно-активные вещества (ПАВ), наночастица, присадка, планетарное шлифование, глубинное шлифование, абразивная обработка.

This paper represents review of modern trends in application of coolant fluids with addition of different additive nano particles during machining process of aviation parts, made of hard material. Results of modified coolant fluids practical application are presented. Mechanism of structurization of modified coolant fluids is described, as well as equipment for its preparation, activation and supply.

Keywords: cooling fluids, surfactant species, nanoparticle, addition agent, planetary grinding, creep-feed grinding, abrasive machining

Введение

В авиационном машиностроении к конструкционным материалам, используемым в авиационном двигателестроении предъявляются высокие эксплуатационные требования. Для достижения требуемой точности и показателей качества, увеличения износостойкости контактирующих поверхностей и снижения сил резания при абразивной обработке планетарно - шлифовальной головкой применяют различные СОТС, подаваемые в зону контакта.

Постановка задачи и цель исследования

Основная цель подачи СОТС в зону резания заключается в осуществлении смазывающего, моющего, охлаждающего и диспергирующего действия. Современные тенденции развития составов СОТС направлены преимущественно на реализацию в зоне резания жидкостного трения, т.е. скольжение поверхностей трения заготовок с абразивным инструментом заменяются

скольжением жидкости со своими реологическими свойствами. Однако в реальных условиях сплошность пленки всегда нарушается хотя бы в момент остановки и запуска процесса резания. В этом случае трение переходит в режим граничного.

Решение проблемы

В работе [1] проводились эксперименты с применением четырех видов СОТС: синтетическая жидкость Simtech 500 (5-% концентрации на водной основе), керосин, соевое масло и рабочая жидкость CANMIST (высокоочищенное масло на жирспиртовой основе). В качестве наномодификатора применялись нано - и микрочастицы дисульфида молибдена MoS₂ (рис.1) [1] величиной не более 100 нм совместно с эмульгаторами триглицеридом (на основе рапсового масла) и лецитином. В таблице 1 представлены составы экспериментальных СОТС [1].

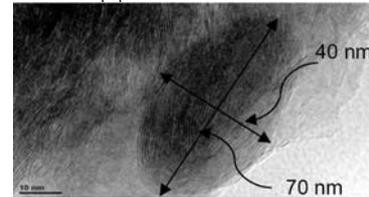


Рисунок 1 – Частица дисульфида молибдена MoS₂

Таблица 1 – Составы применяемых в экспериментах СОЖ

	Базовая СОТС	Количество MoS ₂ , %	Эмульгатор Лецитин, %
	Керосин	Без добавок	–
Низкой концентрации		2	10
Высокой концентрации		8	40
Соевое масло	Без добавок	–	–
	Низкой концентрации	2	10
	Высокой концентрации	8	40
Simtech	Без добавок	–	–
	Низкой концентрации	2	10
	Высокой концентрации	8	40

Эксперименты проводились на плоскошлифовальном станке Chevalier Model Smart-B818 электрокорундовым кругом 32A46-HVBER, скорость круга 30 м/с, глубина резания 0,010 мм, продольная подача 2400 мм/мин, материал заготовки – ковкий чугун 100-70-02, твердостью 48...52 HRC. В результате проведенных экспериментов, с помощью профилометра Taylor Hobson Taylorsurf были определены зависимости: шероховатость обработанной поверхности вдоль и поперек направления обработки и коэффициент шлифования K_ш от процентного содержания нано- и микрочастиц в общем объеме СОТС, а так же от концентрации самой СОТС (рис. 2, 3, 4, 5) [1].

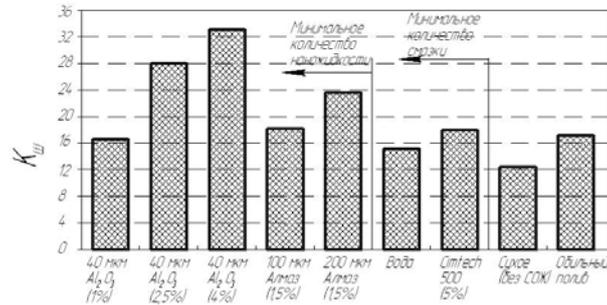


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента шлифования от содержания нано- микрочастиц в СОТС

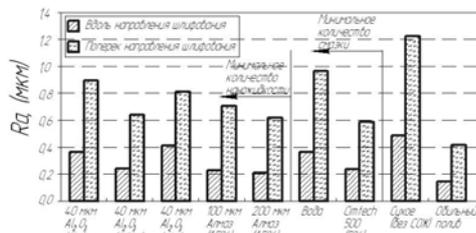


Рисунок 3 – Результаты полученных шероховатостей в продольном и поперечном направлениях от концентрации нано- и микрочастиц в СОТС

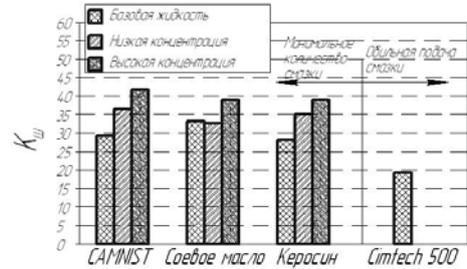


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента шлифования от концентрации СОТС и способа ее подачи

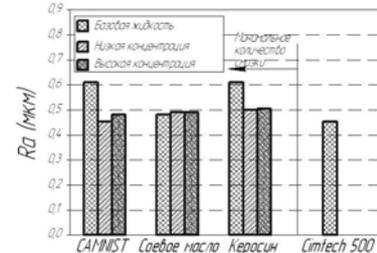


Рисунок 5 – Результаты полученных шероховатостей от концентрации СОТС и способа ее подачи

В исследовательской работе [2] в качестве добавок к СОЖ предлагаются серо-, хлор-, фосфор и азотсодержащие органические соединения. Большое внимание уделяется применению присадок алкилфенольного типа, например, 2,6-ди-третбутил-4-метилфенол (нонол), 4,4-метиленис (4-метил-6-трет.бутилфенол) - НГ-2246 и т.д., а также различным серосодержащим присадкам. Среди алкилзамещенных фенолов эффективным функциональным действием, в особенности, ингибирующим, обладают экранированные фенолы. Серосодержащие присадки представляют интерес благодаря сочетанию антиокислительных, противозадирных и антикоррозионных свойств с хорошей растворимостью в масле. В своей работе автор [2] предлагает в качестве присадки к масляным СОЖ использовать синтетизованную на основе доступных промышленных продуктов (фенол, стирол) присадку - 4-гидрокси-3,5-ди-α-метилбензилмеркаптофенол. Синтетизованное соединение обладает вы-

сокими ингибирующими, причем ингибирующий эффект проявляется уже при низких концентрациях в маслах (0,1-1%), а также антикоррозионными свойствами.

Для оценки эксплуатационно-технологических свойств исследуемый состав СОЖ ИХП-76 был испытан на станке ЗА64Д при шлифовании образцов из стали ШХ-15 и Р9Ф5 абразивным кругом ПП 150 × 12 × 32 характеристики 24А25С12К5. режим обработки: скорость вращения шлифовального круга - 40 м/с, время шлифования - 30 с. Оценку эффективности СОЖ определяли по критериям: съем металла (в мм³), износ круга (в мм³) и шероховатость обработанной поверхности Ra (в мкм).

Наличие прижога на шлифованной поверхности и оценка состояния поверхности круга производилась с помощью микроскопа МБС-2. Результаты испытаний представлена в (табл. 2) [2].

Таблица 2 – Лабораторные экспресс-испытания СОЖ

Сталь	СОЖ	Нагрузка P _н , МПа	Съем металла Q _с , мм ³	Износ круга Q _к , мм ³	Режущая способность круга v _р , м/с	Расход абразивного инструм., г/мин	Кэф-т шлифования К	Касательная составляющая сила F _т , Н	Шероховатость поверхности R _а , мкм
Р9Ф5	ИХП-76	0,2	1,25	3,29	0,32	0,24	1,35	3,1	0,124
		0,1	1,12	2,20	0,29	0,16	1,82	2,4	0,085
	УК-РИ-НОЛ-14	0,2	1,19	3,84	0,31	0,28	1,11	3,1	
		0,1	1,10	2,93	0,28	0,21	1,33	2,7	0,120
	МР-10	0,2	1,22	2,47	0,32	0,18	1,76	2,9	0,115
		0,1	1,15	2,23	0,30	0,16	1,84	2,5	0,085
ШХ-15	ИХП-76	0,4	4,82	5,62	1,30	0,41	3,18	8,0	0,145
		0,3	4,63	5,62	1,25	0,40	3,12	6,4	0,125
	УК-РИ-НОЛ-14	0,4	5,10	5,62	1,37	0,41	3,30	7,8	
		0,3	4,71	5,75	1,27	0,42	2,96	4,9	0,160
	МР-10	0,4	4,90	4,93	1,32	0,36	3,62	8,1	0,210
		0,3	3,98	4,65	1,07	0,34	3,08	5,5	0,165

На основании выше приведенного, можно сформулировать решение каких задач для конкретного способа абразивной обработки должна способствовать модификация СОТС. Так, в условиях гидродинамического режима изменение объемных реологических свойств в сторону увеличения вязкости нежелательно, т.к. это повлечет за собой потерю расходуемой мощности. В то же время желательно изменение реологии в тонком приповерхностном слое

для увеличения устойчивости масляной пленки к деформационным изменениям в условиях растущего механического воздействия.

Согласно [3], введение антизадириной присадки существенно меняет качество трущейся поверхности. Это связано со способностью поверхностно-активных веществ (ПАВ) снижать время приработки в новом трибосопрежении и формировать в нем защитный расклинивающий слой. Однако с ростом нагрузки работоспособность ПАВ резко падает в силу его десорбции с трущихся поверхностей и возможной деградации. Наличие наномодификатора позволяет в значительной степени повысить эффективную способность ПАВ, благодаря должной ориентировке ПАВ в сольватной оболочке и способности удерживать полимерные молекулы в зоне трибоконтакта, а так же способности н.м. к диссипации энергетических потоков в общий объем СОТС по фрактальной сетке, что существенно снижает деструктивные явления, как в масляной среде, так и в приповерхностных слоях трущихся поверхностей.

На основании полученных опытных данных, известных свойств н.м. и ПАВ которым относится антизадириная присадка С-5А возможно представить механизм, действия наноструктурированного СОТС, который поэтапно отражен на (рис. 6) [3].

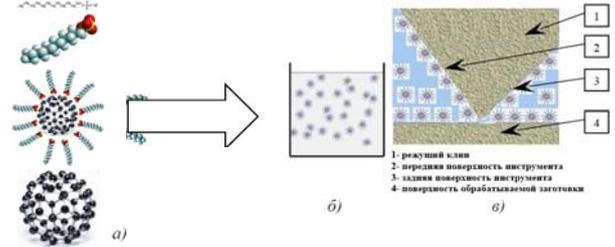


Рисунок 6 – Стадийный механизм наноструктуризации СОТС: а) формирование сольватной оболочки из полимера б) частицы н.м. сорбируют молекулы полимера предотвращая образование мицелл; в) сетка из частиц н.м. на поверхности детали и инструмента

Структуризация СОТС позволяет реализовать желаемые реологические режимы. В табл. 3 представлен обзор применяемых наночастиц для модификации СОТС [1].

Таблица 3 – Общий литературный обзор иностранных изданий изменения теплопроводности СОТС модифицированных наночастицами

Частица	Базовая жидкость	Средний размер частицы, нм	Доля в общем объеме, %	Прирост теплопроводности, %	
1	2	3	4	5	6
СОТС с металлическими наночастицами	Cu	Этиленгликоль	10	0,3	40
	Cu	Вода	100	7,5	78
	Fe	Этиленгликоль	10	0,55	18
	Au	Вода	10 - 20	0,026	21
	Ag	Вода	60 - 80	0,001	17
СОТС с неметаллическими наночастицами	Al ₂ O ₃	Вода	13	4,3	30
	Al ₂ O ₃	Вода	33	4,3	15
	Al ₂ O ₃	Вода	68	5	21
	CuO	Вода	36	5	60
	CuO	Вода	36	2,3	12
	CuO	Вода	50	0,4	17
	SiC	Вода	26	4,2	16
	TiO ₂	Вода	15	5	30
	МУН ⁽¹⁾	Синтетическое масло	Ø25×50	1	150%
	МУН	Децен/Этиленгликоль/Вода	Ø15×30	1	20 / 13 / 7
МУН	Вода	Ø100×70	0,6	38	

(¹) многостенная углеродная нанотрубка

Следует отметить важную роль подготовки СОТС. Равномерное распределение по всему объему составных частей СОТС в значительной степени влияет на сам процесс обработки и на качество будущей поверхности. В работе [5] описывается получение гомогенных мелкодисперсных эмульсий нужного состава с минимальной трудоемкостью и малыми энергозатратами. В качестве исполнительной установки было предложено использование роторного двухкамерного диспергатора для кавитационной обработки жидких рабочих сред. Второе направление – активация СОЖ методами гидродинамической кавитации. Для этого используются специальные устройства непосредственно в станках. Автор [6] предложил способ повышения физико-химической активности СОТС за счет кавитационных насадок, закрепляемых на подающих шлангах (рис. 7) [6].

В результате проведенных экспериментов по обработке шлифованием жаропрочных сплавов с применением такой насадки наблюдалось снижение шероховатости на 0,2...0,3 мкм и остаточных напряжений на 60...90 МПа.

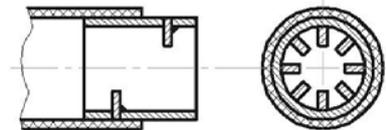


Рисунок 7 – Насадка для создания эффекта кавитации

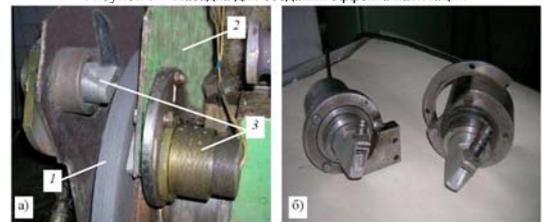


Рисунок 8 – Ультразвуковая техника подачи СОЖ в зону шлифования: а – фрагмент шлифовальной бабки круглошлифовального станка со смонтированными на ней насадками для подачи СОЖ; б – насадки для подачи СОЖ

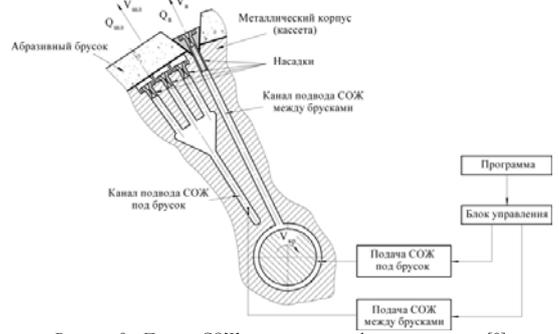


Рисунок 9 – Подвод СОЖ по каналам шлифовального круга [9]

**КИНЕТИКА СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ
ПРИ ОТПУСКЕ ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ 15X5M**

Використовуючи кількісні характеристики зображень мікроструктур і методи комп'ютерної металографії, були запропоновані комплексні показники інтерфейсу структурного стану, що базуються на термодинаміці фазово-структурних перетворень. Виконано розрахунок енергії активації процесу розкладання мартенситу гарту при відпуску з використанням запропонованих показників інтерфейсу структурного стану і наведений порівняльний аналіз цієї кінетичної характеристики, розрахованої за класичною методикою уширення дифракційної рентгенівської лінії.

Используя количественные характеристики изображений микроструктур и методы компьютерной металлографии, были предложены комплексные показатели интерфейса структурного состояния, базирующиеся на термодинамике фазово-структурных превращений. Выполнен расчет энергии активации процесса разложения мартенсита закалки при отпуске с использованием предложенных показателей интерфейса структурного состояния и приведен сравнительный анализ этой кинетической характеристики, рассчитанной по классической методике уширения дифракционной рентгеновской линии.

Using the quantitative characteristics of the images of microstructures and methods of computer metallography have been proposed performance interface integrated structural state based on the thermodynamics of the phase-structural transformations. The calculation of the activation energy of decomposition of martensite during tempering hardening using the proposed indicators of the structural state of the interface and the comparative analysis of the kinetic characteristics calculated by the classical method of broadening of X-ray diffraction lines.

Термическая обработка сталей и сплавов формирует структурное состояние материала, обеспечивающее его физико-механические и эксплуатационные свойства. Превращения при термической обработке связаны с разложением одних структур и образованием других. Из всех термических структурных превращений не многие поддаются строгому количественному описанию, к числу таковых можно отнести разложение аустенита на феррит и цементит при охлаждении, который можно представить в виде С-образной диаграммы. С-образные диаграммы строятся на основе кинетических кривых разложения аустенита, количественно описываемых по концентрации ферритно-цементитной фазы, магнитным характеристикам, dilatометрии и другим показателям [8, 9]. Сложность количественного описания кинетики структурных изменений объясняется отсутствием надежных количественных показателей структурного состояния материала, которые бы легко фиксировались в процессе обработки.

Изображение микроструктуры с формальной точки зрения представляет геометрическое множество упорядоченных и неупорядоченных объектов,

Одним из эффективных способов подачи СОТС непосредственно в зону резания является его транспортирование через капиллярно-пористое пространство шлифовального круга за счет воздействия модулированных ультразвуковыми колебаниями (УЗК) (рис.8) [7]. Автором [7] установлено, что модулированные колебания наиболее эффективно снижают гидравлическое сопротивление СОЖ в капиллярно-пористом пространстве, способствуя многократному увеличению полезного расхода жидкости непосредственно через зону обработки без увеличения ее общего расхода и усилению тем самым охлаждающего действия СОЖ.

Другое конструктивное решение было предложено для прерывистого сборного шлифовального круга [8]. В предложенной системе подачи СОЖ в зону резания (рис. 9) используется подвод ее по радиальным каналам кассеты сборного шлифовального круга. На выходе канала установлены насадки, обеспечивающие активацию СОЖ за счет гидродинамической кавитации. В дальнейшем активированная СОЖ через поры шлифовального круга поступает на его периферию.

Выводы

В условиях граничного трения структуризация СОТС наномодификаторами может способствовать решению еще большего числа проблем связанных как с формированием приповерхностной смазочной пленки, так и с пластификацией металлической поверхности трения при обработке планетарной шлифовальной головкой. Оказание активного воздействия на зону трения с помощью наномодификации возможно в силу особых физико-химических свойств нано- и микрочастиц. Их сорбционная активность способствует равномерному распределению полимера, выполняющего ту или иную роль в СОТС [4]. При этом для достижения максимального эффекта рекомендуется комбинировать прилагаемые технологические пути бездефектного шлифования поверхностей деталей авиационных двигателей.

Список использованных источников: 1. Bin Shen Minimum quantity lubrication grinding using nanofluids: Дис. канд. техн. наук. – Michigan, USA: The University of Michigan, 2008. – 185 с. 2. Мамедова П.Ш. Разработка и исследование эффективной смазочно-охлаждающей жидкости для механической обработки металлов / П.Ш. Мамедова // Нефтегазовое дело. Электронный научный журнал. – Вып. №1. – 2002 С.12-16. 3. Никитин В.А. Повышение износостойкости триботехнических узлов технологической системы при использовании наноструктурированных СОТС / В.А. Никитин, В.М. Петров, А.В. Федосов, Д.Г. Летенко // Инструмент и технологии. – 2008. – № 25. – С. 146-150. 4. Петров Ю.В. Применение наноструктурированных смазочно – охлаждающих технологических сред для механической обработки резанием композиционных материалов / Ю.В.Петров// Студенческая научная весна. Машиностроительные технологии. – 2010. – С.15-18. 5. Фесенко А.В. Повышение эффективности шлифования при гидродинамической обработке СОЖ / А.В. Фесенко, Ю.Н. Любимый // Машинобудування України очима молоді: прогресивні ідеї - наука - виробництво: збірник статей Десятої всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції, 26 - 30 жовтня 2010 р. / Уклад.: В.В. Криворучко, В.О. Іванов. — Суми: СумДУ, 2010. — С. 117-122. 6. Бутенко В.И. Технологические средства, устройства и конструкции инструментов для бездефектного шлифования деталей машин / В.И. Бутенко, Е.С. Фоменко, А.Д. Кулиньский // Обработка материалов резанием. 2008. – №3 (45). – С. 2-8. 7. Ковальнов В.Н. Повышение эффективности совмещенного шлифования с термической СОЖ путем термостабилизации зоны обработки / В.Н. Ковальнов// Дис. канд.техн. наук., специальность 05.03.01, 05.02.08 – Ульяновск: УГТУ, 2000. – 240 с. 8. Фесенко А.В. Повышение эффективности шлифования при активации и рациональном использовании СОЖ / А.В. Фесенко, Ю.Н. Любимый // Вестник Национального технического университета «ХПИ». 2010. – №41. – С.71-100.
Поступила в редколлегию 13.04.2012

несущих информацию об определенной структурной и фазовой составляющей. Совокупность геометрических объектов, максимально отображающих особенность структурной организации, можно отнести к интерфейсу структурного состояния. С развитием компьютерных технологий обработки изображений интерфейс структурного состояния поликристаллического материала может быть представлен с помощью набора числовых показателей, в частности, среднего размера кристаллита, суммарного количества всех зерен на единичной площади шлифа, фрактальной размерностью и т.п. [1, 2, 3]. Используя указанные показатели можно количественно описать структурные изменения при пластической деформации и термической обработке, и это открывает новые возможности для количественного анализа кинетики структурных превращений.

О структурных превращениях судят по изменению формы и размеров кристаллитов, а этот процесс определяется активностью миграции границ зерен. Структура границ зерен и раздела фаз во многом остается нераскрытой, но согласно общепризнанным представлениям она представляет комбинацию упорядоченно ориентированных дислокаций с аморфной фазой. Геометрические размеры и степень когерентности границы определяются углом разориентации смежных кристаллитов, от которых зависит их подвижность или скорость миграции. Изменение формы зерен и миграция границ при пластической деформации происходит преимущественно за счет скопления дислокаций, а при термическом воздействии за счет их переползания. Элементарным актом переползания дислокации является приставление к дислокации атома матрицы или примеси, в результате чего происходит увеличение разорванной экстраатомарной плоскости, что адекватно смещению дислокации на один шаг, равный параметру решетки [4]. Этот механизм носит диффузионный характер, поэтому с повышением температуры активность миграции границ возрастает.

В качестве количественного показателя для описания состояния границ зерен можно использовать суммарную длину периметра всех кристаллитов на единичной площади поверхности шлифа (удельная длина границ), тогда активность миграции границ можно оценить по скорости изменения их удельной длины. Современные технологии обработки изображений позволяют с помощью специальных программ легко определять этот параметр [5].

Удельная длина границ характеризует величину свободной энергии структурного состояния, которая аккумуляруется в виде поверхностной энергии границ раздела. Следовательно, чем выше удельная длина границ, тем больше величина свободной энергии. Удельную длину границ следует различать от плотности границ, которая рассчитывается как отношение периметра зерна к его площади в плоскости сечения шлифа [5]. Плотность границ характеризует структурно-энергетическое состояние отдельного зерна, а удельная

длина границы является одним из показателей структурного состояния материала в целом.

Удельная длина границ и плотность границ принимают высокие значения с уменьшением размера зерна и повышением степени развитости границы. Под развитостью границы понимают ее отклонение от прямой линии.

В статье представлены результаты исследований по структурным превращениям низкоуглеродистой жаростойкой стали 15X5M при закалке, отпуске и отжиге с использованием количественных показателей интерфейса структурного состояния.

Методика исследования.

Исследуемые образцы имели кубическую форму с размером ребра 10 мм из стали 15X5M. Нагрев образцов производили в муфельной печи СНОЛ. Режимы термообработки представлены в таблице 1.

Для идентификации микроструктуры травление шлифов производили 4% азотной кислотой в этиловом спирте. Микроструктуру исследуемых материалов определяли с помощью металлографического микроскопа Микро-200 при 400-х кратном увеличении. Оцифрованные фотографии обрабатывали программой Image.Pro.Plus.5.1. Обработку изображений предусматривали следующие процедуры: корректировку резкости, калибровку в соответствии с кратностью увеличения, снятие контрастной маски, выделение границ, определение длины периметра каждого объекта и расчет удельной длины границ.

Таблица 1 – Режимы термической обработки

№ п/п	Вид термообработки	Температура нагрева, °С	Время выдержки, т, мин	Охлаждающая среда	Микроструктура
1	Закалка	880	15	Вода	Мартенсит
2	Отжиг	880	15	В печи	Феррит и перлит
3	Отпуск	650	15 30 60 120	Вода	Троостит
4	Отпуск	500	15 30 60 120	Вода	Сорбит

После снятия контрастной маски все микроструктурные объекты становятся светлыми или темными. Светлые объекты представляют остаточный аустенит в структуре закаленной стали и феррит в структуре отпущенной и отожженной стали. Разложение мартенсита при отпуске и отжиге заключается в выделении феррито-цементитной фазы разной степени дисперсности, который проявляется как темный объект. К темным объектам можно также

отнести границы зерен и различные концентраторы напряжений, которые после травления идентифицируются как точечные образования. Учитывая изложенное, кинетику структурных изменений при распаде закаленной структуры оценивали по изменению длины границ темных объектов.

Удельная длина границ определяли по формуле:

$$q = \frac{\sum p_i}{S} \quad (1)$$

где p_i – длина периметра i -го темного объекта; S – площадь поверхности шлифа, зафиксированная фотоснимком.

Площадь поверхности S постоянна для каждой кратности увеличения, в частности при 400-х кратном увеличении она составляла $280 \times 250 \text{ мкм}^2$. Все эксперименты проводились при многократном повторении, полученные результаты оценивались статистически.

По временной зависимости изменения удельной длины границ зерен рассчитывалась скорость протекания структурных изменений по формуле:

$$\Delta q = \frac{dq}{dt} \quad (2)$$

где Δq – изменение удельной длины границ за период времени изотермической выдержки Δt .

Результаты и их анализ.

На рис. 1 приведены микроструктуры после закалки и отжига. Сталь 15X5M после закалки имеет основную структуру мартенсита, в которой присутствует верхний бейнит и остаточный аустенит. Это указывает на возможные высокие внутренние напряжения, возникающие за счет разницы удельных объемов упомянутых структур. Мартенситная структура характеризуется субмелкозернистостью, состоящей из отдельных слоев, стыковка которых между собой происходит по двойниковым границам.

Крупные светлые образования представляют остаточный аустенит, объемная доля которых составляет 15...20%. Наличие бейнита является результатом процессов отпуска, сопутствующих мартенситным превращениям.

В закаленной структуре наблюдается множество точечных объектов, которые можно идентифицировать как субмикрлокальные концентраторы напряжений. Распределение таких объектов носит неупорядоченный характер, поэтому в качестве количественной меры интерфейса структурной организации их использование ограничено.

Микроструктура после отжига представляет крупнозернистую феррито-перлитную смесь, характерную для низкоуглеродистых сталей, в которой также присутствуют точечные объекты. Некоторые границы между зернами состоят из отрезков, образующих штрих пунктирную линию, что является признаком ее высокой когерентности по отношению к кристаллографической ориентации смежных кристаллитов. После снятия контрастной маски темные

объекты представляют границы зерен, субмикромасштабные концентраторы напряжений и перлитные кристаллиты, формирующиеся как продукты разложения аустенита при отжиге. Следовательно, кинетику процесса разложения аустенита можно анализировать по характеру изменения темных объектов, и такой подход принципиально применим к разложению мартенсита при отпуске.

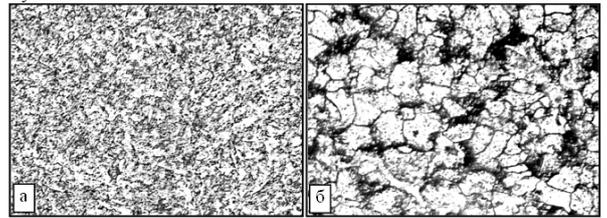


Рисунок 1 – Микроструктура стали 15X5M (x400) после а – закалки, б – отжига

Разложение мартенсита в процессе отпуска закаленной стали делят на несколько стадий [8, 9]. В течение первого периода происходит релаксация внутренних напряжений, остаточный аустенит превращается в мартенсит и формируется стабильная закаленная структура. По завершении первой стадии удельная длина границ резко повышается за счет разложения относительно крупных зерен остаточного аустенита. Так, если после закалки в воде удельная длина границ составила $q = 0,2903 \text{ мкм}^{-1}$, то через 15 минут выдержки при 500 и 650°C она увеличилась соответственно до $0,3364 \text{ мкм}^{-1}$ и $0,4554 \text{ мкм}^{-1}$. Однако, образующиеся при этом границы раздела не отличаются высокой развитостью.

Второй период связан с разложением мартенсита на феррито-цементитные фазы. Этот период является длительным по времени и завершается по мере полного разложения мартенсита. В зависимости от температуры и длительности отпуска феррито-цементитная фаза приобретает различную дисперсность, именуемую как троостит и сорбит, и этот процесс носит взаимосогласованный характер.

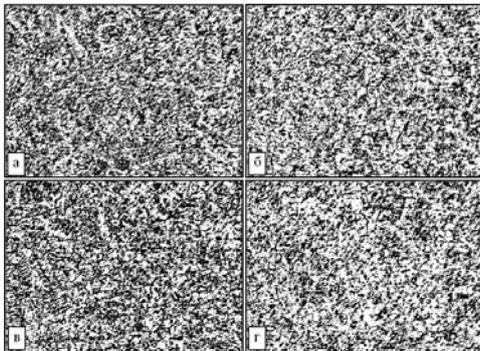


Рисунок 2 – Микроструктура стали 15X5M (x400), образованная при температуре отпуска 500°C и времени выдержки: а – 15 мин; б – 30 мин; в – 60 мин; г – 120 мин

Третий период связан с рекристаллизацией, приводящей к развитию разнородных зерен феррита и перлита. Длительность этого периода неограниченна, так как процесс рекристаллизации не имеет завершения, а скорость структурных изменений мала. Поэтому рекристаллизация на температурах отпуска не представляет практический интерес, и эту термическую операцию производят при более высоких температурах, близких к температуре полиморфных превращений [6]. После длительности отпуска 120 минут видны крупные ферритные зерна, имеющие более округлую форму.

На рис. 2 и 3 представлены микроструктуры стали на разной стадии разложения мартенсита при температурах отпуска 500 и 650°C. Приведенные структуры, соответствующие одной и той же температурной выдержке, визуально мало отличаются друг от друга, но компьютерная обработка изображений раскрывает их ощутимые различия, заключающиеся в следующем.

Светлые микроструктурные объекты, сформированные при более высоких температурах отпуска, располагаются небольшими скоплениями, они крупнее по размерам и имеют более «изрезанные» границы, что в итоге проявляется в повышенной величине удельной длины границы.

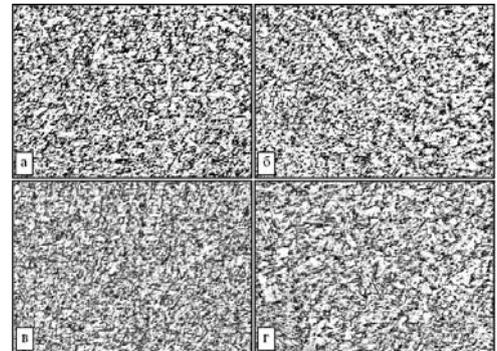


Рисунок 3 – Микроструктура стали 15X5M (x400), образованная при температуре отпуска 650°C и времени выдержки: а – 15 мин; б – 30 мин; в – 60 мин; г – 120 мин

В общем случае с повышением длительности температурной выдержки происходит разложение двойниковых границ и укрупнение микроструктурных объектов с развитыми границами, в результате чего наблюдается повышение удельной длины границ (q). При дальнейшей температурной выдержке зерна приобретают округлую форму, что указывает на начало процесса рекристаллизации. С повышением температуры отпуска указанные процессы протекают более активно, а процесс рекристаллизации начинает проявляться раньше.

Разложение мартенсита при отпуске связано с релаксацией химического потенциала или снижением свободной энергии структурного состояния, в основе которого лежат процессы переноса энергии и массы вещества [7, 8]. Временная зависимость удельной длины границ в период активной фазы разложения мартенсита носит возрастающий характер, которая по мере уменьшения содержания мартенсита должна стабилизироваться, а с началом рекристаллизации должна снижаться. На рис. 4 показана кинетика изменения плотности границ в активной фазе разложения мартенсита, когда процесс еще далек от стадии стабилизации.

Развитие зеренной структуры и миграция границ при тепловом воздействии связаны с перемещением дефектов кристаллического строения. Переполнение дислокаций происходит за счет присоединения к разорванной экстраатомарной плоскости диффундирующего атома. Механизмы перемещения дефектов кристаллического строения при тепловом воздействии носят термоактивационную природу, каждый из которых определяется своей

энергии активации [3, 6]. Тогда количественную характеристику изменения зеренной структуры при тепловом воздействии можно представить в виде уравнения Аррениуса:

$$q = \frac{R}{T} \ln \left(\frac{t}{T} \right) + \frac{E}{RT} \quad (3)$$

где E – энергия активации; t – длительность процесса; T – абсолютная температура; R – газовая постоянная; ϑ и n – постоянные характеризующие скорость протекания структурных изменений.

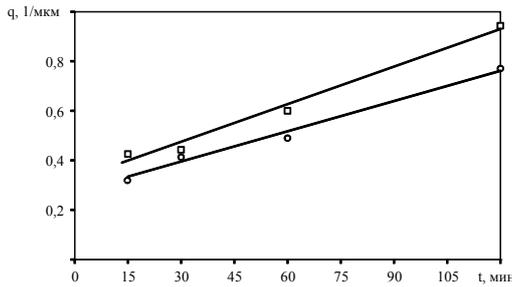


Рисунок 4 – Изменение плотности границ от длительности нагрева при отпуске: а – 500°C, б – 650°C

На рис. 4 приведены изменение плотности границ от длительности и температуры процесса отпуска. Характер временной зависимости показывает, что предэкспоненциальная величина линейно зависит от времени, поэтому можно принять $n = 1$. На основании полученных результатов вычисленная энергия активации составила $E=18128,5$ Дж/моль.

В таблице 2 приведены результаты расчета параметров уравнения Аррениуса, рассчитанные по уширению дифракционной рентгеновской линии ферритной структуры (112), приведенных в [8].

Таблица 2 – Значения параметров уравнения Аррениуса, рассчитанные по данным [8]

Параметры уравнения Аррениуса	Концентрация углерода, %						
	0,11	0,22	0,31	0,38	0,53	0,63	0,91
E , Дж/моль	7210	7968	8255	8887	9661	9982	10499
V_0 , мм	0,3996	0,3717	0,3705	0,3394	0,2986	0,2812	0,2647

Энергии активации, рассчитанные по ширине дифракционной рентгеновской линии и изменению удельной длины границ, не значительно отличаются в большую сторону, хотя относятся к величинам одного порядка. Энер-

гия активации, вычисленная по результатам рентгеноструктурного анализа, учитывает только изменения, происходящие в ферритной структуре, поэтому ее численное значение почти в два раза ниже энергии активации, определенной по изменению количественного показателя интерфейса структурного состояния. Изменение удельной длины границы учитывает процессы, происходящие в структурной организации, поэтому эта характеристика структурной организации несет более полную информацию.

Заключение.

Для математического описания кинетики структурных превращений используют различные количественные структурные характеристики, большинство из которых относят к трудно-измеряемым в методическом отношении. С развитием программных продуктов обработки изображений и вычислительной техники металлография становится компьютерной, позволяющей изображения микроструктур представлять в виде набора числовых показателей. При этом сама микроструктура представляется как множество геометрических объектов, каждый из которых отображает определенную структурную компоненту и характеризуется количественно. Интерфейс структурного состояния представляет совокупность количественных показателей, наиболее полно отражающих структурную организацию материала.

Количественные показатели интерфейса структурного состояния, отражающие изменение границ зерен и раздела фаз, можно использовать для описания структурных превращений при термической обработке и пластической деформации. Структурные превращения термического характера, связанные с развитием и миграцией границ зерен и раздела фаз, могут быть количественно оценены суммарной длиной границ или ее удельной величине.

Характер температурного и временного изменения удельной длины границ позволяет описать кинетику разложения мартенсита при отпуске и расчитать энергетические показатели этого процесса.

Список использованных источников: 1. Панин В.Е. Физическая мезомеханика и компьютерное моделирование материалов. Т.1 / под ред. В.Е. Панина. – Новосибирск: Наука, СИФ РАН, 1995. – 298 с. 2. Балахонов Р.Р. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / Балахонов Р.Р. и др., отв. ред. В.Е. Панин. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. – 520 с. 3. Кристьян Дж. Термодинамика и общая кинетическая теория / Кристьян Дж. Теория превращения в металлах и сплавах: Пер. с англ. – М.: Мир, 1978. 810 с. 4. Новиков И.И. Кристаллография и дефекты кристаллического строения / Новиков И.И., Розин К.М. – М.: Металлургия, 1990. – 336 с. 5. Ким В.А. Количественный структурно-энергетический анализ термообработки конструкционной стали / Ким В.А., Петров В.В. и др. – Металловедение и термообработка металлов. № 4, 2010. – с. 24 – 26. 6. Марвина Л.А. Диффузионные процессы и деградация структуры в металлах / Марвина Л.А., Марвин В.Б. – Владивосток – Благовещенск: Дальнаука – Изд-во АмГУ, 1996. – 276 с. 7. Мерер Х. Диффузия в твердых телах / Мерер Х. Пер с англ. – М.: Издательский дом «Интеллект». 2001. – 536 с. 8. Курдюмов Г.В. Явления закалки и отпуска / Курдюмов Г.В. – М.: Металлургия, 1960. – 64 с. 9. Бернштейн М.Л. Металловедение и термическая обработка стали / Бернштейн М.Л., Рахштад А.Г. – Справ. В 3-х т. Т.П. Основы термической обработки. – М.:Металлургия, 1983. 368 с.

Поступила в редакцию 15.06.2012

УДК 332.144+332.145

И.В. Кононенко, д-р техн. наук, М.Э. Колесник, Харьков, Украина

МОДЕЛЬ И МЕТОД МАКСИМИЗАЦИИ ПРИБЫЛИ В ПРОЦЕССЕ ОПТИМИЗАЦИИ СОДЕРЖАНИЯ ПРОЕКТА

У статті розглядається математична модель задачі оптимізації змісту проекту за критерієм прибутку в результаті його здійснення. Створена модель є однокритеріальною, з булевими змінними, з алгоритмічною цільовою функцією і аналітичними обмеженнями. Запропоновано метод розв'язання даної задачі.

В статті розглядається математична модель задачі оптимізації змісту проекту за критерієм прибутку в результаті його здійснення. Розроблена модель є однокритеріальною, динамічною, з булевими змінними, з алгоритмічною цільовою функцією і аналітичними обмеженнями. Предложено метод рішення даної задачі.

In this paper we consider a mathematical model of scope project optimization problems by profits as a result of its implementation. The proposed model is a one-criterion, dynamic, with Boolean variables, with the objective function of the algorithmic and analytical limitations. A method for solving this problem is proposed.

Актуальность. Для решения задачи оптимизации содержания проекта по критериям прибыль, сроки, стоимость, качество и риски проекта с помощью метода, основанного на применении обобщенного критерия и неявного перебора, необходимо иметь решение однокритериальных задач. В том числе задачи оптимизации содержания проекта по критерию прибыль в результате осуществления проекта. Решение данной задачи во многих случаях может иметь и самостоятельное значение.

Следовательно, возникает актуальная задача создания модели и метода оптимизации содержания проекта по критерию прибыли.

Качественная постановка задачи

Формирование содержания проекта традиционно осуществляется на эвристическом уровне. Часто работы или комплексы работ включаются в состав проекта без достаточного анализа их влияния на другие работы. При этом количество рассматриваемых альтернатив обычно невелико. Данная ситуация объясняется большой трудоемкостью анализа альтернативных вариантов работ или их комплексов в многоэтапных проектах. В работе [1] предложены модель и метод оптимизации содержания проекта с точки зрения времени его выполнения. В работе [2] рассматриваются модель и метод оптимизации содержания проекта по критерию затраты на его осуществление при наличии ограничений на сроки. В работе [3] впервые предложена многокритериальная модель задачи оптимизации содержания проекта по критериям время и стои-

мость при наличии альтернативных вариантов выполнения работ или их комплексов, заданных в виде сетевых моделей. В работе [4] предложены модель и метод оптимизации содержания проекта по срокам и стоимости его выполнения при наличии ограничений на качество продукта после выполнения определенных этапов проекта. В работе [5] предложена математическая модель динамической задачи многокритериальной оптимизации содержания проекта при наличии ограничений и заданных альтернативных вариантах выполнения работ, представленных в виде сетевых моделей. Впервые в качестве критериев рассмотрены прибыль в результате выполнения проекта, качество продукта проекта, время выполнения проекта, его стоимость и связанные с ним риски. Предложен метод решения данной задачи. Для его осуществления необходимо иметь результаты однокритериальной оптимизации содержания проекта по критериям прибыль, качество, время, стоимость и риски.

Целью работы является создание модели и метода оптимизации содержания проекта по критерию прибыль, которая может быть получена в результате его осуществления.

Целевая функция модели должна отражать прибыль предприятия до налогообложения за все годы жизненного цикла.

В модели предполагается, что после завершения отдельных этапов выполнения проекта не должно быть финансовых задолженностей.

Модель задачи оптимизации содержания проекта по критерию прибыль, это модель вида:

$$\sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T C_l^{(t)} D_l^{(t)} - \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^{M_h} w_{hj} x_{hj} + \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^{M_h} E_{hj} x_{hj} - \sum_{t=1}^T U_t = P' \rightarrow \max_{x_{hj}} \quad (1)$$

$$S_h = S_{h-1} + K_h - \sum_{j=1}^{M_h} w_{hj} x_{hj}; S_h \geq 0, \quad h = \overline{1, H}; \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{M_h} x_{hj} = 1, \quad h = \overline{1, H}; \quad (3)$$

$$x_{hj} \in \{0, 1\}, \quad j = \overline{1, M_h}, \quad h = \overline{1, H}; \quad (4)$$

где T - длительность фазы эксплуатации или потребления продукта; l - вид продукции, общее количество которых равно L ; $C_l^{(t)}$ - стоимость продукции l -го вида в t -м году, $t = \overline{1, T}$; $D_l^{(t)}$ - прогноз спроса на продукцию l -го вида в t -м году, $l = \overline{1, L}$, $t = \overline{1, T}$;

где
$$D_t^{(l)} = \begin{cases} A_t^{(l)}, & \text{если } A_t^{(l)} \leq B_t^{(l)}; \\ B_t^{(l)}, & \text{если } A_t^{(l)} > B_t^{(l)}; \end{cases} \quad (5)$$

$$A_t^{(l)} = \varphi_A(G, x_{kj}), t = \overline{1, T}; \quad (6)$$

$$x_{hj} \in \{0, 1\}, \quad j = \overline{1, M_h}, \quad h = \overline{1, H}; \quad (7)$$

$B_t^{(l)}$ – прогнозируемый спрос на продукцию l -го вида в t -м году;

$A_t^{(l)}$ – производственная мощность по l -му виду продукции в t -м году;

M_h – количество вариантов выполнения операций на этапе h , $h = \overline{1, H}$;

h – номер этапа выполнения операций;

H – количество этапов в проекте;

w_{hj} – стоимость выполнения операций j -го варианта сетевой модели на h -м этапе (может складываться из стоимостей нескольких операций);

x_{hj} – булева переменная, равная единице, если осуществляется j -й вариант выполнения операций на h -м этапе, и равная нулю в противном случае;

G – сетевая модель операций проекта, включающая альтернативные варианты их выполнения, $G = \{A, Z, \tau, W\}$;

A – множество узлов сети,

$$A = \{a_{hij}\}, \quad i = \overline{1, n_j}, \quad h = \overline{1, H}, \quad j = \overline{1, M_h},$$

где a_{hij} – i -я операция, осуществляемая на h -м этапе в j -м варианте (альтернативе) сетевой модели;

n_j – количество операций в j -м варианте сетевой модели;

Z – множество направленных дуг,

$$Z = \{z_{hij, pmf}\}, \quad i = \overline{1, n_j}, \quad m = \overline{1, n_f}, \quad h, p = \overline{1, H}, \quad j = \overline{1, M_h}, \quad f = \overline{1, M_p},$$

где $z_{hij, pmf}$ – дуга, которая выходит из узла i на этапе h альтернативного варианта j и входит в узел m на этапе p альтернативного варианта f ; $i \neq m$ при $p = h$; $p \geq h$;

τ – множество сроков выполнения операций в узлах,

$$\tau = \{\tau_{hij}\}, \quad i = \overline{1, n_j}, \quad h = \overline{1, H}, \quad j = \overline{1, M_h},$$

141

где τ_{hij} – срок выполнения i -й операции на h -м этапе для j -го варианта выполнения операций;

W – множество стоимостей выполнения операций сети,

$$W = \{w_{hij}\}, \quad i = \overline{1, n_j}, \quad h = \overline{1, H}, \quad j = \overline{1, M_h},$$

где w_{hij} – стоимость выполнения i -й операции на h -м этапе для j -го варианта выполнения операций;

E_{hj} – остаточная стоимость выбывающих основных фондов при осуществлении на h -м этапе j -го варианта выполнения работ по проекту;

U_t – текущие затраты, связанные с производством продукции;

$$U_t = \varphi_c(G, x_{hj}), t = \overline{1, T};$$

S_h – остаток денежных средств после выполнения работ на h -м этапе;

K_h – объем денежных средств, выделяемых на h -м этапе.

Предложенная модель является однокритериальной, динамической, с булевыми переменными, с алгоритмической целевой функцией и аналитическими ограничениями.

Для решения данной задачи предложен метод оптимизации, относящийся к методам неявного перебора. Для сокращения объема вычислений в главном цикле этого метода и, соответственно, сокращения времени решения целесообразно провести предварительную подготовку информации. Подготовка информации для метода оптимизации содержания проекта с точки зрения прибыли заключается в вычислении нижней границы для затрат, связанных с осуществлением работ на каждом h -м этапе, $h = \overline{1, H}$. Для этого вначале определим затраты, связанные с реализацией на h -м этапе каждого j -го варианта выполнения работ

$$Z_{hj} = w_{hj} - E_{hj} + \sum_{t=1}^T U_{hjt}, \\ h = \overline{1, H}, \quad \forall j = \overline{1, M_h},$$

где U_{hjt} – текущие затраты в t -м году, связанные с осуществлением на h -м этапе j -го варианта выполнения работ.

Затем на каждом h -м этапе находим вариант, связанный с минимальными затратами, и определяем эти затраты

142

$$Z_{h \min} = \min \{Z_{hj}\}_{j=1}^{M_h}$$

Значения $Z_{h \min}$ будут использованы в методе оптимизации содержания проекта по критерию прибыль.

Метод оптимизации содержания проекта по критерию прибыль состоит из ряда шагов.

$\Theta_H = \emptyset$, Θ_H – множество вариантов j , выбранных на всех H этапах проекта;

$$h := 1; \quad f := 0; \quad f^* := +\infty.$$

1. Начинаем рассмотрение с l -го варианта, т.е. $j_h := 1$.

2. Проверяем, выполняется ли ограничение (2)

$$S_h = S_{h-1} + K_h - \sum_{j=1}^{M_h} w_{hj} x_{hj}; \\ S_h \geq 0.$$

Если ограничение не выполняется, переходим к шагу 8.

3. Определяем прибыль, которая может быть получена в результате выполнения операций на всех этапах от 1-го до h -го включительно

$$P_h^* = \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^L C_t^{(l)} D_t^{(l)} - \sum_{k=1}^h \sum_{j=1}^{M_h} w_{kj} x_{kj} + \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^{M_h} E_{kj} x_{kj} - \sum_{k=1}^h \sum_{j=1}^k \sum_{t=1}^T U_{kjt} x_{kj},$$

где U_{kjt} – текущие затраты в t -м году, связанные с осуществлением на h -м этапе j -го варианта выполнения работ. Осуществляем присвоение $f := -P_h^*$.

4. Оцениваем нижнюю границу для затрат, которые могут быть понесены в результате выполнения всех оставшихся этапов, т.е. начиная от $h+1$ -го до H -го включительно.

$$Z_h = Z_{h+1, \min} + Z_{h+2, \min} + \dots + Z_{H, \min}$$

Значения $Z_{h+1, \min} + Z_{h+2, \min} + \dots + Z_{H, \min}$ были определены на этапе подготовки информации.

Величина $\pi = P_h^* - Z_h$ является оценкой верхней границы для прибыли, которая может быть получена на этапах от 1-го до H -го включительно. Если $-\pi \geq f^*$, то использование j -го варианта не приведет к решению лучшему, чем рекордное, переходим к шагу 8.

143

5. Если $h < H$, рассматриваем следующий этап проекта, $h := h + 1$ и возвращаемся к шагу 2.

6. Задаем новое значение рекорда $f^* := f$ и запоминаем множество

$$\Theta_H = \Theta_H \cup \{j_h\}.$$

7. Если $j_h < M_h$, анализируем следующий вариант, т.е. $j_h := j_h + 1$ и возвращаемся к шагу 3.

8. Если $h > 1$ возвращаемся на предыдущий этап, т.е. $h := h - 1$. Извлекаем из памяти значение j_h и возвращаемся к шагу 8. Если $h = 1$ и $\Theta_H = \emptyset$, задача не имеет решения, иначе получено оптимальное решение. Значение целевой функции $P^* = f^*$, $F_1 := P^*$.

Результаты. В результате проведенной работы были предложены математическая модель и метод оптимизации содержания проекта по критерию прибыль. Разработанные модель и метод необходимы для решения более масштабной задачи оптимизации содержания проекта по критериям прибыль, сроки, стоимость, качество и риски проекта с помощью метода, основанного на применении обобщенного критерия и неявного перебора.

Модель в сочетании с разработанным методом предназначена для решения задач оптимизации содержания проекта для условий, когда любая работа последующего этапа в проекте не может быть начата до завершения работ предыдущего этапа. При этом альтернативные варианты выполнения работ могут относиться как к одному этапу их выполнения, так и к нескольким этапам.

Предложенная математическая модель и метод оптимизации на следующих этапах работы будет применена для оптимизации проекта развития инструментального производства ИП ХМЗ «ФЭД».

Список использованных источников: 1. Кононенко И.В. Математическая модель и метод минимизации сроков выполнения работ по проекту / И.В. Кононенко, Е.В. Емельянова, А.И. Грицай // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2007. – №2/6 (26). – С. 35–40. 2. Кононенко И.В. Математическая модель и метод минимизации затрат по проекту при ограничениях на сроки выполнения работ / И.В. Кононенко, Е.В. Емельянова // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»: сб. науч. тр. Темат. вып. : Системный анализ, управление и информационные технологии. – № 4. – X., 2009. – С. 46–53. 3. Кононенко И.В., Мироненко В.А. Математическая модель и метод оптимизации содержания проекта с точки зрения времени и стоимости его выполнения. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 1 / 2 (43) 2010 С. 12–17. 4. Кононенко И. В. Двухкритериальная оптимизация содержания проекта при ограничениях на качество продукта / И. В. Кононенко, И. В. Протасов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2010. – №5/4 (47). – С. 57–60. 5. Кононенко И. В. Оптимизация содержания проекта по критериям прибыль, время, стоимость, качество, риски / И. В. Кононенко, М. Э. Колесник // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2012. – №1/10 (55). – С. 13–15.

Поступила в редакцию 11.05.2012

144

А.В. Кривошея, канд. техн. наук, В.Я. Рыбак, канд. техн. наук,
 А.А. Микищенко, В.Е. Мельник, В.Р. Коробко, Киев, Украина
 В.С. Надеин, канд. техн. наук, Кировоград, Украина

АНАЛИЗ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ИЗНОШЕННЫХ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

У статті на конкретному прикладі розкриті особливості формоутворення зношених крупногабаритних циліндричних зубчатих коліс.

В статті на конкретному прикладі розкриті особливості формоутворення зношених крупногабаритних циліндричних зубчатих коліс.

In this paper a specific example disclosed features of formation of large worn spur gears.

Актуальность. Крупномодульные крупногабаритные цилиндрические зубчатые передачи 8-ой-9-ой степени точности используются в приводах шаровых мельниц на горно-обогатительных комбинатах (ГОКах) Украины. Так, на Ингулецком ГОКе в приводе шаровой мельницы используется зубчатая передача 9-ой степени точности модулем 20мм, числами зубьев 268 и 26, шириной зубчатого венца 800 мм и углом наклона линии зубьев 5°15'.

В результате эксплуатации в течении 8-9 лет величина износа по нормали к профилю зубьев большего зубчатого колеса составляет 7-8 мм.

Для такой степени точности зубчатых колес окончательной технологической операцией по формообразованию их зубьев является зубофрезерование червячными фрезами.

Учитывая, что стоимость нового большого зубчатого колеса диаметром более 5 метров составляет около 1 млн. гривен экономически обоснованным является восстановление функциональных и эксплуатационных характеристик такого зубчатого колеса после его износа, используя изношенное зубчатое колесо как заготовку, что является важной народно-хозяйственной задачей.

Анализ литературы. Для восстановления крупногабаритных изношенных зубчатых колес Институтом сверхтвердых материалов совместно с Институтом электросварки был разработан и внедрен способ восстановления таких зубчатых колес заключающийся в наплавке на зубчатый венец более 2-ух тонн специальной наплавки и последующего зубофрезерования специальными сборными твердосплавными червячными фрезами до восстановления прежних размеров зубчатого колеса [1]. И хотя этот способ был экономически оправданным, все же был трудоемким и дорогостоящим. В то же время особенность конструкции привода шаровых мельниц, позволяющую в широких пределах изменять межосевое расстояние в зубчатой передаче, анализ

величины и формы износа зубчатых венцов позволяют предположить о возможности восстановления крупногабаритного зубчатого колеса без применения наплавки, путем повторного формообразования с применением смещения исходного контура, его модификации или с применением новых видов профиля типа Новикова-Вильдагера [2].

Цель работы. Целью данной работы является анализ способа повторного формообразования изношенных крупногабаритных зубчатых колес без наплавки и его реализация.

Задачи работы. Для достижения поставленной цели необходимо:

1. Разработать обобщенную математическую модель формообразования цилиндрических зубчатых колес с различным профилем.
2. Выполнить анализ формообразования и определить рациональную форму профиля исходной формообразующей рейки для различной величины износа.
3. Разработать конструкцию и изготовить специальную сборную крупномодульную червячную фрезу.
4. Испытать один из вариантов технологического формообразования крупногабаритного зубчатого колеса.

Следует отметить, что при обработке зубчатых колес 8-ой 9-ой степени точности профиль червячной фрезы в сечении нормальном к линии зуба на начальном диаметре соответствует профилю исходной формообразующей (производящей) рейки. Поэтому анализ формообразования зубчатых колес достаточно провести при анализе плоской системы зубчатых зацеплений [3].

Кинематическая схема формообразования цилиндрических зубчатых колес исходной формообразующей рейкой представлена на рис.1, [4].

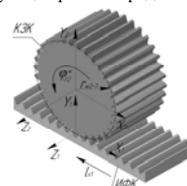


Рисунок 1 – Кинематическая схема формообразования, т.е. относительного движения исходного формообразующего реечного контура в системе координат заготовки контура зубчатого колеса (для наглядности изображена объемная модель пары рейка-колесо)

Согласно схеме изображенной на рис.1. исходный формообразующий реечный контур движется параллельно оси X_1 с параметром l_{z1} и вместе с системой X_1Y_1 вращается вокруг системы X_2Y_2 с параметром φ_{z2}^w . Между па-

раметрами движения существует связь, так как они происходят одновременно, т.е. $l_{z1} = K_{Lk1} \varphi_{z2}^w$, где, $K_{Lk1} = -r_w(2-1)$.

Параметр относительной установки (параметр относительного расположения) систем координат равен: $C_{y12} = -r_w(2-1)$.

В соответствии с теорией отображения аффинного пространства [5] запишем уравнение движения профиля ИФК относительно заготовки в системе координат заготовки (1):

$$m_{rПБ}(\varphi_z^w, \varphi_z^u) = m_\phi(\varphi_z^w) \cdot m(C_y^u) \cdot m_1(\varphi_z^w) \cdot m_{rП1}(\varphi_z^u) \quad (1)$$

где, $m_{rП1}(\varphi_z^u)$ – матричное уравнение профиля зуба исходного формообразующего реечного контура собственной системе координат X_1Y_1 ; $m_{rПБ}(\varphi_z^w, \varphi_z^u)$ – матричное уравнение движения профиля исходной формообразующей рейки в системе координат контура заготовки X_2Y_2 .

В матричном виде уравнение относительного движения запишется следующим образом (2):

$$m_{rПБ}(\varphi_z^w, \varphi_z^u) = \begin{pmatrix} \cos(\varphi_{z2}^w) & -\sin(\varphi_{z2}^w) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin(\varphi_{z2}^w) & \cos(\varphi_{z2}^w) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & l_{z1}^w \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(\varphi_z^w) \\ y(\varphi_z^w) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Для определения формообразованного профиля зубчатого колеса будем использовать кинематический способ формообразования, при котором в системе координат заготовки, точка движущего ИФК будет формообразующей, если вектор нормали в этой точке будет перпендикулярен аналогу вектора относительной скорости этой точки.

Тогда уравнение формообразования можно представить в виде (3):

$$NV = 0 \quad (3)$$

где,

$$N(\varphi_z^w, \varphi_z^u) = \frac{d}{d\varphi_z^w} m_{rП1}(\varphi_z^w, \varphi_z^u) \quad (4)$$

$$V(\varphi_z^w, \varphi_z^u) = \frac{d}{d\varphi_z^w} m_{rПБ}(\varphi_z^w, \varphi_z^u) \quad (5)$$

Решая данное уравнение найдем для каждой точки профиля ИФК параметр движения при котором она будет формообразующей. После чего подставив значение параметра движения в уравнение движения (1) найдем точки формообразованного профиля впадины зубчатого контура.

Следовательно классическая математическая модель формообразования состоит из уравнения относительного движения ИФК в системе координат заготовки, уравнений связи между параметрами относительного движения (1)

и уравнения формообразования (уравнения зацепления) и запишется в соответствии с методикой изложенной в [4] следующим образом (6).

$$\left\{ \begin{aligned} m_{rПБ}(\varphi_z^w, \varphi_z^u) &= m_\phi(\varphi_z^w) \cdot m(C_y^u) \cdot m_1(\varphi_z^w) \cdot m_{rП1}(\varphi_z^u) \\ l_{z1} &= K_{Lk1} \varphi_{z2}^w \\ -\frac{\pi}{4} \leq \varphi_{z2}^w \leq \frac{\pi}{4} \\ K_{Lk1} &= r_w(2-1) \\ C_{y12} &= r_w(2-1) \\ NV &= 0 \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Следовательно для решения вопросов формообразования необходимо составить матричное уравнение исходного формообразующего реечного контура с различным профилем. В данной работе при анализе формообразования мы используем эвольвентный профиль и профиль Новикова.

В соответствии с принятой во всем мире системой расчета при теоретическом формообразовании цилиндрических зубчатых колес решается обратная задача формообразования, т.е. задается исходный реечный контур и как его контршаблон - исходный формообразующий реечный контур. Для эвольвентных цилиндрических зубчатых передач для зубчатого колеса и шестерни существует единый исходный и единый исходный формообразующий контур регламентированный ГОСТ 13755-81, (рис.2).

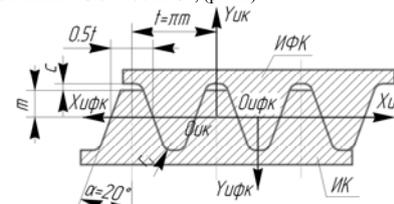


Рисунок 2 – Стандартный исходный реечный контур и совпадающий исходный формообразующий реечный контур не модифицированной цилиндрической эвольвентной зубчатой передачи

Для разработки математической модели и анализа формообразования необходимо математически описать каждый участок профиля зуба исходного формообразующего реечного контура в собственной системе координат $X_1 Y_1$.

Математическая модель исходного формообразующего контура в соответствии с методикой изложенной в [6] запишется следующим образом (7):

$$F(\varphi^u) = \begin{cases} m_{r11}(-\varphi^u - (0.5\pi - x_c) + (\alpha - \frac{\pi}{2} + \phi_1)) + p \\ \text{if } -(0.5\pi - x_c) + (\alpha - \frac{\pi}{2} + \phi_1) \leq \varphi^u \leq \phi_1 + (\alpha - \frac{\pi}{2}) \\ m_{rR1}(R_r - \varphi^u + (\pi + \alpha) + \phi_1) + v_c \text{ if } \phi_1 + (\alpha - \frac{\pi}{2}) \leq \varphi^u \leq \phi_1 \\ m_{r12}(\varphi^u) + 0.25\pi \text{ if } \phi_1 \leq \varphi^u \leq -\phi_1 \\ m_{rR2}(R_r \varphi^u + \alpha) + \phi_1 + q_c \text{ if } -\phi_1 \leq \varphi^u \leq -\phi_1 - (\alpha - \frac{\pi}{2}) \\ m_{r13}(-\varphi^u - (\alpha - \frac{\pi}{2} + \phi_1) - (x_c + 0.5\pi)) + w \\ \text{if } -\phi_1 - (\alpha - \frac{\pi}{2}) \leq \varphi^u \leq -(\alpha - \frac{\pi}{2} + \phi_1) - (x_c + 0.5\pi) \end{cases} \quad (7)$$

Для профилей отличных от эвольвентного для каждого зубчатого колеса передачи необходимо задавать свой исходный и свой исходный формообразующий контур.

Исходные формообразующие речные контура для шестерни и колеса зубчатой передачи с профилем Новикова представлены на рис. 3.

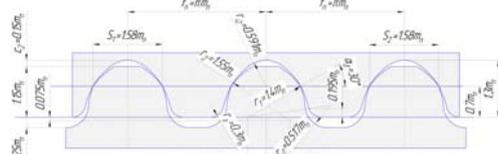


Рисунок 3 – Исходные формообразующие контура для зубчатого колеса и шестерни зубчатой передачи с профилем Новикова

Математические модели исходных формообразующих контуров зубчатой передачи с профилем Новикова запишутся следующим образом:

Для зубчатого колеса (8):

$$m_{r11}(\varphi^u) = \begin{cases} 27.95 \cos(\varphi^u) - 40.16 \\ 27.95 \sin(\varphi^u) - 5 \\ 0 \\ 1 \\ 11.92 \cos(\varphi^u) + \frac{17\pi}{18} + 0.896 \\ 11.92 \sin(\varphi^u) + \frac{17\pi}{18} - 11.923 \\ 0 \\ 1 \\ -\varphi^u + \frac{25}{18}\pi + 0.896 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{cases} \begin{cases} \text{if } 1.883 \leq \varphi^u \leq \frac{17}{18}\pi \\ \text{if } \frac{17}{18}\pi \leq \varphi^u \leq \frac{25}{18}\pi \\ \text{if } \frac{25}{18}\pi \leq \varphi^u \leq \frac{25}{18}\pi + 0.896 \end{cases} \quad (8)$$

Для шестерни (9):

$$m_{r11}(\varphi^u) = \begin{cases} \varphi^u \cos(\frac{7}{12}\pi) + 30.943 \cos(\frac{\pi}{12}) - 11.026 \\ \varphi^u \sin(\frac{7}{12}\pi) + 30.943 \sin(\frac{\pi}{12}) - 1.5 \\ 0 \\ 1 \\ 30.943 \cos(\varphi^u + \frac{\pi}{12}) - 11.026 \\ 30.943 \sin(\varphi^u + \frac{\pi}{12}) - 1.5 \\ 0 \\ 1 \\ 11.798 \cos(\varphi^u - 1.671) \\ 11.798 \sin(\varphi^u - 1.671) + 14.152 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{cases} \begin{cases} \text{if } -7.328 \leq \varphi^u \leq 0 \\ \text{if } 0 \leq \varphi^u \leq -\frac{\pi}{12} - \arctg 0.962 \\ \text{if } -\frac{\pi}{12} - \arctg 0.962 \leq \varphi^u \leq 1.3 \end{cases} \quad (9)$$

Примеры формообразованных эвольвентного профиля и профилей с зацеплением Новикова представлены на рис. 4.

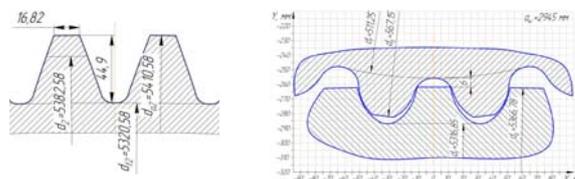


Рисунок 4 – Эвольвентный профиль колеса и профили зацепления Новикова

Проведенный анализ формообразования показал, что до величины износа 5 мм можно использовать при формообразовании изношенных зубчатых колес эвольвентный профиль, а для величин износа более 5 мм и до 8 мм необходимо использовать профиль Новикова.

Для реализации процесса формообразования изношенных зубчатых колес были спроектированы специальные сборные червячные фрезы, объемные модели которых представлены на рис. 5, а узел крепления пластин-зубьев на рис. 8.



Рисунок 5 – Объемные модели червячных фрез для зацепления Новикова (а) и эвольвентного зацепления (б).

После чего исходя из приведенных расчетов и объемных моделей были сделаны червячные фрезы при помощи которых были обработаны крупногабаритные зубчатые колеса и введена в эксплуатацию передача с выпуклым профилем на Ингулецом ГОКЕ рис. 6, [7].



Рисунок 6 – Червячная фреза для обработки зубчатого колеса с профилем Новикова (а) и изготовленная зубчатая передача (б).

Особенностью червячной фрезы является то, что ее, делают сборной, т.е. в корпусе в прямых пазах расположены режущие элементы, которые прижаты со стороны передней поверхности в направлении опорной поверхности пазов при помощи прижимных элементов. Режущие элементы выполняются в виде клиньев, при этом одна сторона этих клиньев непосредственно взаимодействуют с опорной поверхностью прямых пазов, а противоположная сторона передняя поверхность поджимается прижимным элементом при помощи клина. Клинья в сборе создают ступеньки, угол наклона которых соответствует углу подъема винтовой линии фрезы на ее расчетном диаметре начального цилиндра рис. 7, [8].

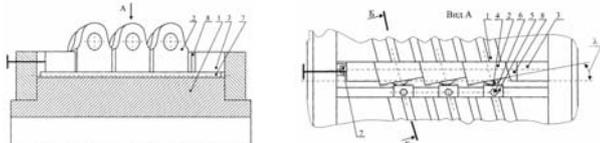


Рисунок 7 – Конструкция червячной фрезы для обработки крупногабаритных зубчатых колес: 1 – корпус фрезы; 2 – режущий клин; 3 – мерная опорная вставка; 4 – прижимной элемент; 5 – клиновидный элемент; 6 – винт; 7 – цилиндрический стержень (типа пруток).

Благодаря установке типовых режущих элементов вдоль прямого паза, а не в ступенчатую рейку уменьшается количество баз установки режущих элементов, в следствии чего увеличивается точность обработки.

Нижние поверхности режущих элементов для базирования в радиальном направлении взаимодействуют с цилиндрическими стержнями, заложенными в поперечные угловые канавки на дне прямых пазов рис. 8.

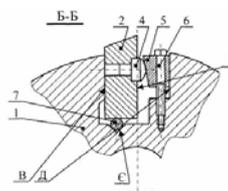


Рисунок 8 – Узел крепления режущего элемента червячной фрезы для обработки крупногабаритных зубчатых колес

Благодаря базированию режущих элементов в радиальном направлении при помощи цилиндрических стержней (типа прутков), которые заложены в продольные угловые канавки на дне прямых пазов, улучшается технологичность червячной фрезы.

Выводы.

1. Эксплуатация зубчатой передачи в течении 6 месяцев показала перспективность направления восстановления крупномодульных зубчатых колес методом формообразования изношенных зубчатых колес без наплавки

2. В дальнейшем необходимо исследовать возможность формообразования изношенных зубчатых колес с износом до 8 мм с использованием эвольвентного модифицированного профиля.

Список использованных источников: 1. Вторую жизнь крупногабаритным зубчатым колесам во многом обеспечил комплект твердосплавных фрез / О.А. Розенберг и др. // Инструмент. Світ. – 2000. – № 9. – с. 4-7. 2. Новиков М.Л. Основные вопросы геометрической теории точечного зацепления, предназначенного для зубчатых передач большой мощности: Дис. ... Д-ра. Техн. наук. – М., 1956. – 324 с. 3. А.В. Кривошей, В.Е. Мельник, С.И. Сташкевич. Совершенствование обобщенной структурной схемы теоретического формообразования плоских контуров цилиндрических зубчатых колес с различным профилем 478 - 484 с. 4. Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. Сборник научных трудов. – Вып. 12 – Киев: ИСМ им. В.Н.Бакуля, НАН Украины, 2009. – 544 с. 5. Кривошей А.В., Мельник В.Е., Корнечко А.В. Математические модели формообразования звеньев плоских систем зубчатых зацеплений. Сверхтвердые материалы. – Киев, 2003 г., вып. 5, 60-76. 6. Мельник В.Е. Описание аффинного пространства в теории формообразования поверхностей резанием. – Харьков: Вышш шк., 1981. – 107с. 7. Мельник В.Е. Совершенствование методики математического описания исходных формообразующих профилей системы зубчатых зацеплений. Резание и инструмент в технологических системах: Межд. науч.-техн. сборник. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2004 – Вып. 66 – 247 с. С.97-108. 7. О.А. Розенберг, В.Я. Рыбак, А.В. Кривошей, В.Е. Мельник, В.В. Лотоус. Анализ и пути совершенствования восстановления крупногабаритных крупномодульных зубчатых передач шаровых мельниц горно-обогатительных комбинатов 484 – 490 с. Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. Сборник научных трудов. – Вып. 12 – Киев: ИСМ им. В.Н.Бакуля, НАН Украины, 2009. – 544 с. 8. Патент України на корисну модель № 34950 МПК В23F 21/00. / Червячная фреза / О.О. Розенберг, В.Я. Рыбак, О.А. Микищенко та ін. Опубл. 26.08.08, Бюл. № 16.

Поступила в редколлегию 06.05.2012

Г.К. Крыжний, канд. техн. наук, Харьков, Украина

ВЗАИМОСВЯЗЬ ДВУХ ЦИКЛОВ ЖИЗНИ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА КАЧЕСТВО ПРОДУКЦИИ

В статті аналізуються особливості двох циклів життя продукції, а саме цикл життя товарного продукту та цикл життя конкретного виробу, а також взаємозв'язок споріднених етапів цих двох циклів. Показується подібність відповідних циклів життя для матеріальної продукції з різних галузей та значні відмінності для сфери послуг. Ключові слова: цикл життя товарного продукту, цикл життя виробу, взаємозв'язок циклів, якість продукції.

В статті аналізуються особливості двох циклів життя продукції, а именно цикл жизни товарного продукта и цикл жизни изделия, а также взаимосвязь родственных этапов этих двух циклов. Показывается сходство соответствующих циклов жизни для материальной продукции с разных отраслей и значительные отличия для сферы услуг. Ключевые слова: цикл жизни товарного продукта, цикл жизни изделия, взаимосвязь циклов, качество продукции.

The article covers the analysis of peculiarities of product life cycle, particularly life cycle of marketable products and item life cycle, as well as the interdependence between the related phases of the two cycles. The similarities of the corresponding life cycles for material products of different areas and significant distinctions for service industries are researched. Keywords: life-cycle of the product, life cycle of commodity products, link cycles, the quality of the products.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важнейшими научными и практическими задачами. Рассматривая вопросы, связанные с инновационным процессом или с системой качества, мы обязательно затрагиваем понятие жизненного цикла изделия. Действия, которые необходимо предпринимать для решения возникающих проблем, будут различными в зависимости от того, на каком этапе жизненного цикла продукции, технологии или вида деятельности появились эти проблемы. Поэтому, если появились неточности в определениях понятий жизненного цикла и его этапов, возможности различений отдельных положений, то это вносит определенные сложности при разработке и анализе инновационных процессов и систем качества.

Анализ последних исследований и публикаций, в которых намечено разрешение данной проблемы.

Этот вопрос затрагивался еще во времена Советского Союза, когда действовала система создания и освоения новой техники (СОНТ). В учебнике [1] на основании ГОСТа [2] жизненный цикл представлен в виде последовательности 9 стадий.

Начальная стадия не нумеровалась и как бы не требовала затрат труда и времени, а потребность общества в изделии то ли предполагалась очевидной, то ли ниспосылалась сверху.

В настоящее время этот стандарт трансформировался в Российской Федерации новый стандарт на систему разработки и постановки продукции на

производство (СРПП) [3]. Структуру СРПП определяют применительно к жизненному циклу продукции, для этого стандарты СРПП подразделяют на 10 классификационных групп.

В международном стандарте ИСО 9004-1-94 [4] отмечается, что система качества, как правило, взаимосвязана со всеми видами деятельности, определяющими качество продукции. Ее действие распространяется на все этапы жизненного цикла продукции и процессы от первоначального выявления потребностей рынка до конечного удовлетворения установленных требований. Типичными этапами являются следующие:

1. маркетинг и изучение рынка;
2. проектирование и разработка продукции;
3. планирование и разработка процессов;
4. закупки;
5. производство или предоставление услуг;
6. проверки;
7. упаковка и хранение;
8. реализация и распределение;
9. монтаж и ввод в эксплуатацию;
11. техническая помощь и обслуживание;
12. послепродажная деятельность;
13. утилизация или переработка продукции в конце полезного срока службы.

В работе [5] отмечается, что есть два направления развития качества продукции: генеральный и отдельный. Если взять, например, автомобильную промышленность, то качество автомобилей в целом повышается, а отдельно взятого конкретного автомобиля – понижается. Качество продукции изменяется во времени, а, следовательно, является функцией времени. Но в этом случае правомерно сказать, что качество является и функцией этапов жизненного цикла продукции. В этой же работе отмечается, что приведенный выше перечень этапов относится к двум циклам жизни: цикл жизни товарной продукции и цикл жизни конкретного изделия. Цикл жизни товарной продукции – это период времени от появления новой идеи и воплощения в новом продукте до морального старения этого продукта и снятия его с производства. В цикле жизни конкретного изделия материальные ресурсы по мере перемещения по производственным подразделениям предприятия претерпевают трансформацию и превращаются из сырья в готовое изделие, которое затем продается, транспортируется, эксплуатируется, физически изнашивается и отравляется в утиль.

Аналогией этих двух циклов жизни может служить подготовка специалистов в университете. Например, ВУЗ готовит специалистов определенной специальности по соответствующему учебному плану, т.е. технологии. Подготовка кадров данного направления может существовать и десятки, и сотни

лет до ее морального устаревания. Это жизненный цикл подготовки данных специалистов в рассматриваемом ВУЗе. Но каждый выпускник данного ВУЗа имеет свой жизненный цикл (путь). Эти два жизненных цикла пересекаются в период обучения конкретного человека в данном университете. И говорить о том, что жизненный цикл данной специальности начинается с обоснования необходимости открытия данной специальности в ВУЗе и разработки учебных планов и программ, а заканчивается похоронами подготовленных специалистов, было бы просто неприлично.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена данная статья.

В то же время возникает вопрос, – а какова взаимосвязь и взаимозависимость родственных этапов двух циклов жизни? Какое влияние оказывает эта взаимосвязь на качество продукции? Где лучше добиваться повышения качества продукции?

Формулировка целей статьи (постановка задач).

Выяснить какова взаимосвязь родственных этапов двух циклов жизни и ее влияние на качество продукции.

Изложение основного материала исследования с полным обоснованием полученных научных результатов.

Анализ показывает [5], что цикл жизни продукции предприятия может рассматриваться в двух аспектах (рис.), в двух циклах жизни. Обобщая можно отметить, что в цикле жизни продукции решаются стратегические вопросы товарной политики, технической политики, маркетинговой политики распределения, включая и сервисную поддержку продукции, и политику в области качества. В цикле жизни изделия преобладают задачи исполнительского плана по превращению в жизнь разработок, выполненных на этапах цикла жизни продукции предприятия.

Возникает вопрос: каково взаимное влияние этих двух циклов жизни? Анализ показывает, что два цикла жизни продукции не только пересекаются на этапах производства, но и тесно связаны между собой. Эти два цикла можно было бы назвать сямскими близнецами, но рождаются они не одновременно и их развитие может происходить с некоторым смещением во времени.

Качество продукции обеспечивается на этапах обоих циклов жизни, но в разной степени. В статье [6] показана экономическая значимость начальных стадий разработки и освоения изделия. Если взять три главные составляющие обеспечения качества выпускаемой продукции: разработка, подготовка производства и производство, то решениями, принятыми на этапе маркетинговых исследований и проектирования, закладывается 75% уровня качества изделия. На оставшиеся два этапа остается только 25%, при этом на подготовку производства приходится 15% и на само производство 10%. Это значит, что на этапе подготовки производства уже невозможно изменить уровень качества изделия более чем на 15%, а на долю производственных подразделений достается только 10% возможностей влияния (положительного) на уровень качества

ва. Таким образом, все решается на начальном этапе разработки. Разработка изделия и подготовка производства относятся к циклу жизни товарного продукта. Следовательно, именно в этом цикле жизни закладывается уровень качества продукции.

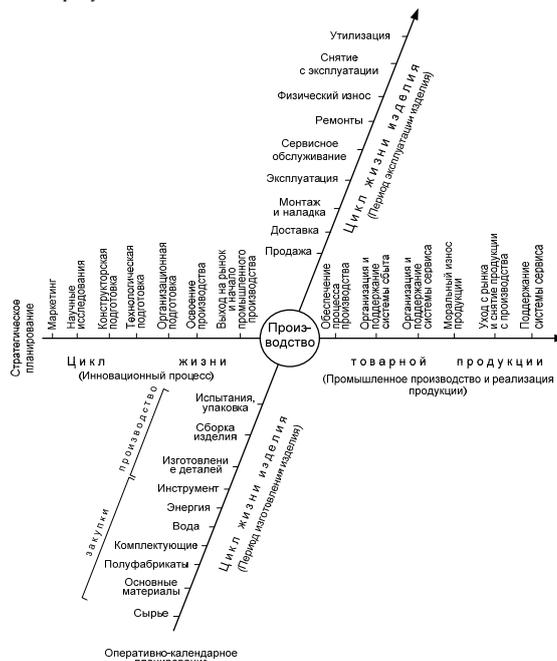


Рисунок – Два цикла жизни продукта [5]

Что касается реально произведенных затрат на освоение товара, то на начальном этапе разработки, где все и решается, предприятие тратит мало. Это объясняется тем, что хотя и задействуется высококвалифицированный персонал, но он немногочисленный, еще нет закупок и отсутствуют капита-

ловложения в оборудование. Зато на стадии производства, где мало возможностей повлиять на уровень качества продукции, производятся основные затраты. То же самое можно сказать и о себестоимости изделий.

На этапе производства основная часть затрат относится к циклу жизни изделия. Следовательно, мы можем сказать, что уровень качества продукта складывается решениями, принятыми в цикле жизни товарного продукта, а доля участия в этом процессе решений, принятых в цикле жизни изделия, незначительна. Незначительная в том смысле, что в процессе изготовления изделия не допускается отклонение от технологической документации, разработанной в цикле жизни товарного продукта, даже если это делается с благими намерениями повышения качества. Свой вклад в качество продукции производство вносит, изготавливая изделия строго по технологической документации. Если производственные подразделения имеют определенные идеи по улучшению технологии, то они могут их реализовать только по согласованию с отделом главного технолога.

Естественно, существует тесная зависимость между этапом технологической подготовки производства из цикла жизни продукции и движением материальных ресурсов и их трансформацией в готовое изделие, то есть изготовлением на предприятии. Характер процесса изготовления полностью определяется технологической подготовкой производства. Но существует и обратная связь – при разработке совокупности мероприятий, обеспечивающих технологическую готовность производства, обязательно учитываются сложившийся на предприятии технологический потенциал и разрабатываются мероприятия по его совершенствованию с целью совершенствования технологических процессов и возможности повышения уровня качества производимой продукции.

Но даже изделия, изготовленные в строгом соответствии с требованиями технической документации, могут оказаться не конкурентоспособными на рынке, уступая по уровню качества изделиям других производителей. В этом случае производство оказывается бессильным помочь своей организации. Здесь должны вступить в действие циклы жизни товарного продукта.

В цикле жизни товарного продукта на этапе конструкторской подготовки принимается и решение «сделать или купить», которое коренным образом влияет на период изготовления в цикле жизни изделия. Если будет принято решение о производстве всех составляющих на предприятии, то производство станет многопрофильным, с использованием множества технологий. Качество продукции при этом целиком зависит от самого предприятия. Второй крайний вариант – это сборка с готовых элементов, полученных от других производителей. Предприятие занимается только сборкой, осваивает так называемую «отверточную технологию». Здесь качество изделия зависит в большей степени от поставщиков комплектующих, но потребители все равно связывают качество продукции с предприятием, выпускающим конечную продукцию. И только если поставщик комплектующего изделия указывает свою марку и оно значимое для данного продукта, например двигатель само-

лета, то поставщик берет на себя ответственность за двигатель, а значит, разделяет и ответственность за самолет.

Отдел снабжения производит закупки в соответствии со спецификациями, разработанными в конструкторском и технологическом отделах, то есть в цикле жизни товарного продукта. Но закупки материалов, полуфабрикатов и комплектующих сопровождаются нестабильностью их свойств и характеристик от партии к партии, срывом сроков поставок, сменой поставщиков и т.д. Поэтому работа отдела снабжения во многом predetermined решениями, принятыми на этапах жизненного цикла товарной продукции, но для выполнения этих решений снабженцам приходится решать множество оперативных вопросов, связанных со своевременным обеспечением производства качественными материалами, комплектующими, инструментами. От их работы во многом зависит качество выпускаемых изделий.

При принятии важных решений по закупкам в этом процессе могут принимать участие и представители отдела сбыта, поскольку качество материалов и комплектующих влияет на качество конечной продукции и ее конкурентоспособность, а значит и на ее сбыт. При закупках сложного оборудования выбор производит технические службы – отдел главного технолога, отдел главного механика, отдел главного сварщика и т.д., а окончательное решение принимает технический директор.

Имеется и взаимосвязь отделов маркетинга и сбыта. Функция маркетинга, относящаяся к циклу жизни товарного продукта, заставляет предприятие выводить на рынок товар, ожидаемый покупателями, и готовит рынок к приему новой продукции потребителями, помогая, таким образом, функции сбыта из цикла жизни изделия.

Важна также информация, поступающая от отдела сбыта и службы сервиса, которые работают непосредственно с покупателями, к подразделениям НИОКР. В результате этой взаимосвязи обобщенные требования рынка поступают в конструкторское бюро, где производится разработка новых модификаций изделий или модернизация существующих. Так, на взаимодействии цикла жизни изделия и цикла жизни товарного продукта отслеживается и удовлетворяется требуемый на рынке уровень качества продукции.

Организация и поддержание системы сервиса в цикле жизни товарного продукта вызвано тем, что в настоящее время предложение предприятия состоит из материальной составляющей и сопутствующих услуг, что повышает качество предложения в целом и обеспечивает конкурентоспособности происходит в основном за счет расширения сервисных услуг. Реализация сервисных услуг осуществляется, главным образом, у потребителя в процессе эксплуатации изделий. Это гарантийное и послегарантийное обслуживание, ремонты, что относится к циклу жизни изделия. Такое взаимодействие циклов жизни изделия позволяет эффективно использовать потенциал изделия, долгие сохранить его характеристики качества.

Большое значение имеет взаимосвязь этапов разработки изделия и этапа эксплуатации. Если цикл жизни товарного продукта осуществляется одним предприятием, а если какие-то этапы и выполняются на стороне, то по заказу

данного предприятия, то цикл жизни конкретного изделия делится на два периода, которые реализуются на разных предприятиях или в разных организациях – период изготовления протекает на заводе-изготовителе, а период эксплуатации – у покупателя изделия. Если предприятия-производители не разрабатывают и не выпускают широкую гамму модификаций изделий, что им экономически выгодно, то они закладывают повышенные расходы у потребителей их продукции. В этом случае часть потребителей вынуждены использовать устройства меньшей производительности, или меньшей мощности, или меньшей скорости по сравнению с потребными, а другие, наоборот, используют устройства с характеристиками, превышающими их потребности. И то, и другое ведет к неэффективному использованию изделий. Поскольку качество продукта, это его способность удовлетворять потребности и ожидания конкретного потребителя, то для одних потребителей изделия будут качественными, а для других некачественными. Увеличение количества модификаций более полно удовлетворяет потребности всех потенциальных потребителей, изделия становятся для них качественными, а эксплуатация экономически более эффективной.

Перекликаются также этапы снятия продукции с производства и утилизации изделий. Однако связи между ними практически нет, это совсем разные вещи. Снятие продукции с производства является следствием ее морального устаревания и относится к жизненному циклу продукции, а утилизация – следствием физического износа и относится она к циклу жизни конкретного изделия. Взаимосвязь появится в том случае, если в жизненном цикле продукции службой сервиса будет разработана система утилизации изделий. Но такая система утилизации предприятиями разрабатывается редко, например, при утилизации радиоактивно зараженного оборудования, сборе фотопленок для извлечения серебра и т.д. В большинстве случаев утилизацией занимаются другие структуры.

Как ни парадоксально, но этап утилизации более тесно связан с этапом проектирования продукции. В изделии конструкторы обычно используют для деталей различные материалы в зависимости от их назначения. В некоторых изделиях используются дорогостоящие материалы, и даже благородные металлы. Чтобы они не попали в общей массе черных металлов в металлургическую печь, необходимо изъять эти материалы из утилизируемой конструкции. Для этого потребитель должен быть информированным о ценных материалах в конструкции, а также необходимо, чтобы эти материалы были легко извлекаемыми из конструкции, что далеко не всегда имеет место. Это тоже один из показателей качества продукции.

Выводы по данному исследованию и перспективы дальнейшего развития в данном направлении.

Продукция характеризуется двумя циклами жизни. Один из них, цикл жизни товарного продукта, характеризует определенную продукцию предприятия в ее совокупности. Для него характерно принятие стратегических решений от разработки концепции изделия до снятия его с производства вследствие морального устаревания. Для цикла жизни конкретного изделия

характерны тактические решения, исполнительская дисциплина и соблюдение требований технологической документации. Этапы этих двух циклов имеют взаимосвязь и взаимовлияние. Но несомненным является то, что это разные циклы, и в них решаются различные задачи. Что касается качества продукции, то в цикле жизни товарного продукта решаются вопросы, касающиеся уровня качества продукции и ее конкурентоспособности, а в цикле жизни конкретного изделия – обеспечения заданных технической документацией характеристик качества и дальнейшее использование в соответствии с инструкцией по эксплуатации. Следовательно, в этих двух рассмотренных циклах жизни решаются различные задачи по обеспечению качества, и для их решения необходимо иметь четкое представление о циклах жизни и этапах, из которых они состоят.

В дальнейшем необходимо рассмотреть привязку проблем, возникающих в области качества продукции, к этапам жизненных циклов, на которых эти проблемы должны решаться. И в соответствии с этим должна производиться и разработка систем качества.

Список использованных источников: 1. Организация и планирование машиностроительного производства: Учеб. для машиностр. спец. вузов / под ред. М.И. Ипатова, В.И. Постникова и М.К. Захаровой. – М.: Высш. шк., 1988. – 367 с. 2. ГОСТ 15.000-82. Система разработки и постановки продукции на производство. Общие положения. – Введ. 01.09.85. – М.: Изд-во стандартов. 1982. – 50 с. 3. ГОСТ Р 15.000-94 Государственный стандарт Российской Федерации. Система разработки и постановки продукции на производство. Основные положения. Дата введения 1995-01-01. 4. Международный стандарт ИСО 9004-1-94 «Управление качеством и элементы системы качества». 5. Крыжневый Г.К. Качество и два цикла жизни продукции // Високи технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. Харків, НТУ «ХПІ», 2010. – Вип. 1 (20). – С.107-117. 6. Крыжневый Г.К., Федорович В.А., Верезуб Н.В., Козакова Н.В. Пути обеспечения качества на этапе разработки продукта // Сучасні технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць/Под ред. В.О.Федоровича.-Харьков: НТУ «ХПІ», 2009.-С.225-230.

Поступила в редакцию 15.06.2012

В.А. Кузнецов, д-р техн. наук, И.В. Заболотная, А.В. Смирнов, Д.И. Юшин, Н.В. Хомякова, А.А. Владыка, Москва, Россия.

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМОГО АНАЛИЗА И СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА МЕТОДОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ (МИД) ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ПРИНЦИПИАЛЬНО НОВОГО УРОВНЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ИЗДЕЛИЙ

У статті розглядаються основи системного аналізу та структурного синтезу методів виготовлення деталей. Запропоновано класифікацію технологічних ланцюгів, що досягаються при реалізації даних методів, і здійснено їх квантифікація. Представлені узагальнені алгоритми для морфологічного і евристичного структурного синтезу методу виготовлення, що застосовується при його вдосконаленні.

Ключові слова: структурний синтез, квантифікація, метод виготовлення.

В статье рассматриваются основы системного анализа и структурного синтеза методов изготовления деталей. Предложена классификация технологических цепей, достигаемых при реализации данных методов, и осуществлена их квантификация. Представлены обобщенные алгоритмы для морфологического и эвристического структурного синтеза метода изготовления, применяемые при его совершенствовании.

Ключевые слова: структурный синтез, квантификация, метод изготовления.

In article bases of the system analysis and structural synthesis of component manufacturing methods are considered. Classification of the technological chains reached at realisation of given methods is offered, and carried out it's quantification. The generalised algorithms for morphological and heuristic structural synthesis of the manufacturing method are presented at its perfection.

Структурный синтез основан на представлении метода изготовления деталей в виде технической системы.

Под технической системой понимают организованный комплекс средств для достижения общей цели. При этом, данный комплекс имеет иерархическую структуру, каждый из элементов которой по степеням иерархии являются средством достижения цели элемента или подсистемы более высокого уровня.

В свою очередь, метод изготовления деталей определяется способами формирования заданных параметров качества с производительностью, соответствующей наименьшим затратам в заданных условиях производства.

Из этого следует, что общей целью, которая достигается при применении того или иного МИД является получение детали с заданными параметрами качества.

Методу изготовления детали как любой системе присущи четыре основных свойства:

- 1) Целостность и членимость;
- 2) Свойство связи;

- 3) Организация;
- 4) Интегративные качества.

Для формализованного описания метода изготовления детали как системы наиболее удобным математическим аппаратом является теория графов. Связь структурных элементов МИД задается графом S(Q,T), множество вершин которого изоморфно составляющим метода изготовления детали, а множество дуг – отношением «ρ», «ω», «τ», с помощью которых выражается временная упорядоченность действий определенных составляющих. Применяя вышеуказанные отношения, можно комбинировать составляющие МИД с целью создания новых вариантов. Отношение «a₁αa₂» обозначает последовательный метод совмещения составляющих, отношение «a₁αa₂» - одновременность действия составляющих метода изготовления, отношение «a₁πa₂» сдвиг их действия во времени. Наряду с временной упорядоченностью, структура МИД как система характеризуется ступенчатостью, которая распространяется на различную глубину. Применяя к исходной системе определенный способ расчленения, можно получить множество подсистем первого уровня {Q₁, Q₂, Q₃, Q₄, Q₅}. Проредавая эту же операцию для каждой подсистемы первого уровня, можно получить множество подсистем второго уровня {Q₁², Q₂², ... Q_k²}. Результатом такого расчленения будет граф структуры системы, вершинами которого являются составляющие метода изготовления детали.

Функция МИД заключается в преобразовании исходного материала в готовую деталь и описывается отображением θ: K₀θK_k. В этом случае исходное и конечное состояния обрабатываемой детали определяется множеством параметров качества, которыми являются:

1. Модули упругости и упрочнения первого рода;
2. Модули упругости и упрочнения второго рода;
3. Предел текучести и прочности;
4. Твердость материала и распределение твердости по глубине и длине детали;
5. Точность размера, формы и расположения поверхностей детали;
6. Волнистость и шероховатость поверхности;
7. Конфигурация детали;
8. Анизотропия свойств материала детали;
9. Химический состав материала.

Метод изготовления детали может состоять из нескольких стадий «φ».

Учитывая выше изложенное, можно описать функцию МИД графом F(k, θ):

$$F(k, \theta) = k_0 \varphi_1 k_1 \dots k_{k-1} \varphi_k k_k \quad (1)$$

Так как для реализации заданной функции могут быть созданы методы с различной структурой, то необходимо ввести оценочные функции, с помощью которых можно определить эффективность того или иного метода. Оценочные функции в этом случае являются технической характеристикой метода изготовления детали, состоящей из некоторого множества параметров: Z = {Z₁, Z₂, ..., Z_n}.

В качестве оценочной функции принимают производительность обработки, стойкость инструмента, энергоемкость процесса и т.д. Комплексным критерием оценки эффективности МИД может быть принята себестоимость изготовления деталей, прибыль или приведенные затраты.

Таким образом, информационная модель метода изготовления детали как технической системы описывается рядом отношений, определяющих функцию, техническую характеристику и структуру системы на всех уровнях расчленения:

$$Q^0 = Q : K_0 -> K_k, S^0(Q^1, T), \{Z_j^0\}; \quad (2)$$

$$Q^1 = \{\{\varphi^1 : K_{j-1}^1 -> K_j^1, S^1(Q^2, T), \{Z_{ij}^1\}\}; j=1, m_1; \quad (3)$$

$$Q^2 = \{\{\varphi^2 : K_{j-1}^2 -> K_j^2, S^2(Q^3, T), \{Z_{ij}^2\}\}\}; j=1, m_2; \quad (4)$$

$$Q^3 = \{\{\varphi^3 : K_{j-1}^3 -> K_j^3, S^3(Q^4, T), \{Z_{ij}^3\}\}\}; j=1, m_3; \quad (5)$$

Разработанная информационная модель позволяет перейти к формализованному описанию процесса синтеза МИД и их совершенствования, а также использовать для этого вычислительную технику.

Рассматриваемые выше функция и техническая характеристика метода изготовления детали состоит из определенного числа целей, которые необходимо достигнуть при реализации процесса обработки детали.

На основе анализа научно-технической и патентной литературы было разработано граф-дерево целей, достигаемых при реализации методов деталей (рис. 1). Технологические цели разбиты на четыре большие группы: образование поверхностей детали, технологическое обеспечение, управление и развитие. Цели, достигаемые при образовании поверхностей детали также разделены на три группы, характеризующие обеспечение заданного качества при максимальной производительности труда и минимальных затратах на изготовление в конкретных условиях производства. Цели технологического обеспечения определяют функции, которые необходимо учитывать при выборе и расчете требуемого для изготовления детали способа воздействия на обрабатываемый материал, обрабатывающего инструмента, кинематических, динамических и статических составляющих метода изготовления детали. Цели управления указывают на осуществление управляющих воздействий выше приведенными составляющими метода обработки. Группа целей развития перекликается в определенной мере с целями при образовании детали и включает в себя цели, которые характеризуют улучшение качества обработанных заготовок и детали, а также с повышением других технико-экономических показателей технологических процессов и операций. При разработке граф-дерева технологических целей был осуществлен процесс квантификации целей. Данный процесс производится до тех пор, пока во всех ветвях вершинах графа не будут содержаться количественно определяемые цели. Затем на основании и изучения научно-технической и патентной литературы может быть произведен анализ взаимосвязей технологических целей, стоящих при образовании детали и развитии с характеристиками метода изготовления деталей и построение круговых графов взаимосвязей между целями развития и характеристиками МИД.

Проведенный анализ позволит выявить характеристики, влияющие на наибольшее количество технологических целей, совершенствование которых дает наибольший эффект по улучшению качественных и технико-экономических показателей процессов обработки деталей. На основании полученных графов можно сделать вывод, что доминирующее влияние на максимальное количество целей имеют способ воздействия на обрабатываемый материал и обрабатывающий инструмент. Это позволяет, в свою очередь, наметить пути совершенствования МИД, выявить и сформулировать для этого физические и технологические принципы, а так определить направления технологических и фундаментальных исследований взаимосвязей целей с характеристиками МИД. После нахождения взаимосвязей целей с характеристиками метода изготовления деталей на следующем этапе системного анализа необходимо создать логико-множественную модель метода и процесса его синтеза.

Синтез метода изготовления детали может осуществляться по двум основным алгоритмам.



Рисунок 1 – Структура технологических целей

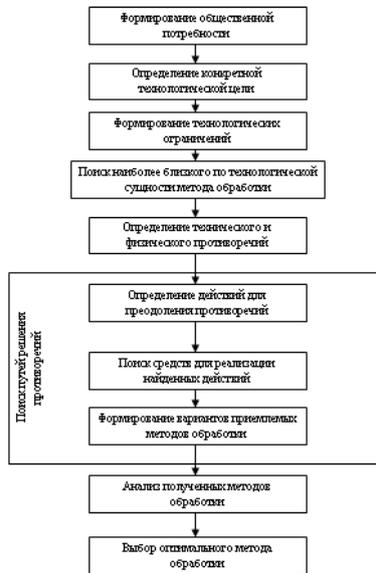


Рисунок 2 – Алгоритм эвристического синтеза метода обработки

Алгоритм эвристического синтеза относительно выбранного прототипа, т.е. наиболее близкого по технической сущности МИД представлен на рис. 2 и может быть применен в том случае, если в действующем производстве необходимо улучшить качество обрабатываемых деталей и другие технико-экономические показатели операции или техпроцесса. Наиболее важными этапами вышеуказанного алгоритма являются поиск и анализ прототипа с определением технического или физического противоречий, а также поиск путей решения выявленных противоречий с формированием вариантов приемлемых технических решений. Их анализ и выбор оптимального метода изготовления детали осуществляется по заранее выбранному критерию оптимальности (себестоимости, производительности, стойкости инструмента и т.д.) Для реализации выбранного МИД может быть осуществлена разработка нового или модернизация существующего оборудования, инструмента и тех-

нологической оснастки. При технологической подготовке производства деталей из новых конструкционных материалов может возникнуть необходимость проектирования индивидуального метода изготовления детали, имеющего принципиальные отличия от всех существующих. В этом случае проектирование осуществляется по алгоритму, представленному на рис. 3, который включает в себя синтез технического решения по каждой характеристике МИД и технологическим объектам его реализации. В каждом из блоков алгоритма после выбора тех или иных характеристик МИД осуществляется проектирование и расчет средств их реализации. Разработанные математические выражения и формальные алгоритмы позволяют приступить к созданию подробных алгоритмов и программ для математического моделирования структурного и параметрического синтеза методов изготовления деталей с применением ЭВМ.

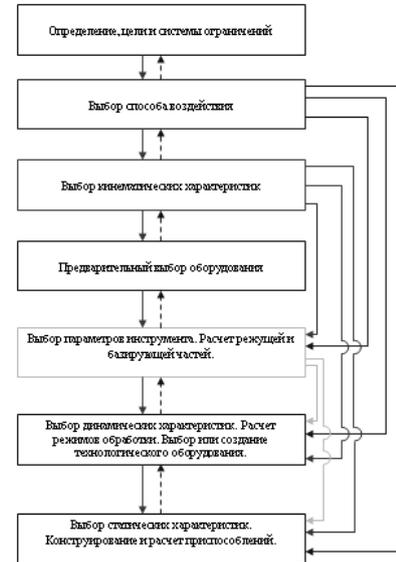


Рисунок 3 – Алгоритм морфологического синтеза метода обработки

Выводы

1. Решение задачи совершенствования существующих и создания новых методов изготовления деталей осуществлено с помощью системного анализа. МИД рассмотрен как подсистема более крупной системы «Технологический процесс» с присущими ему свойствами. Представление МИД как технической системы позволило разработать его информационную модель, которая оценивается рядом соотношений, определяющих функцию, техническую характеристику и технологическую структуру системы на всех уровнях расчленения.
2. Предложена классификация технологических цепей, достигаемых при реализации методов изготовления деталей и осуществлена их квантификация. Анализ взаимосвязей технологических целей с характеристиками метода изготовления деталей, осуществленный с помощью теории графов позволил выявить его характеристики, влияющие на наибольшее число технологических цепей.
3. Используя методы математической логики и теорию множеств, была разработана математическая модель метода изготовления деталей, показывающая взаимосвязи его характеристик с другими технологическими объектами, участвующими в процессе изготовления деталей. Логические выражения, составляющие данную модель, позволяют установить порядок синтеза метода изготовления детали и средств его технического оснащения, в том числе с помощью ЭВМ.
4. Разработаны обобщенные алгоритмы для морфологического и эвристического структурного синтеза метода изготовления, применяемые при его совершенствовании. В результате анализа эвристического алгоритма выявлено, что наиболее важным этапом при совершенствовании методов изготовления деталей является определение физического или технического противоречия, а также нахождение действий и средств для его разрешения.
5. На основании разработанной методологии разработаны новые методы, способы и приемы механообработки деталей типа зубчатых колес, рычагов, втулок и валов. Для их реализации созданы конструкции круглодиагональных протяжек (А.С. № 1096061, 1287996, 1440633), деформирующих и деформирующее-режущих протяжек и прошивок для обработки отверстий (А.С. № 1085710, 1159769, 1215894, 1399025, 1634398, 1703305), комбинированных ротационных инструментов (А.С. № 1162578) и многофункциональных инструментов для обработки деталей резанием и поверхностным пластическим деформированием (А.С. № 1237399, 1442327, 1572766).

Поступила в редакцию 15.04.2012

УДК 621.7.02

М.Ю. Куликов, д-р техн. наук; В.Е. Иноземцев; Мо Наинг У, Москва, Россия.

СПОСОБ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ С ПОМОЩЬЮ КОМБИНИРОВАННОЙ МЕХАНОЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Дана стаття присвячена забезпеченню якості поверхневого шару пористих спечених матеріалів. Вона відноситься до існуючих методів підвищення якості поверхні.

Данная статья посвящена обеспечению качества поверхностного слоя пористых спеченных материалов. Она относится к существующим методам повышения качества поверхности.

This article is devoted to ensuring the quality of the surface layer of porous sintered materials. It refers to the existing methods to improve the quality of the surface. The different factors affecting the machining at the surface. This problem is almost nobody has, so the solution to this problem, all as true.

Обеспечение качества поверхностного слоя деталей из труднообрабатываемых материалов в процессе резания является важнейшей задачей в машиностроении, так как уровень качества полученной поверхности в дальнейшем скажется на эксплуатационном ресурсе всей детали и работоспособности конкретного узла. К таким труднообрабатываемым материалам можно отнести и пористую металлокерамику, получаемую в порошковой металлургии методами прессования металлических порошков с добавлением порообразователя [1] и спеканием при соблюдении ряда условий. Данная металлокерамика широко используется для изготовления антифрикционных вкладышей и втулок в автомобилестроении, машиностроении, приборостроении, нефтедобывающей промышленности и многих других отраслях. Предварительно готовые вкладыши из металлокерамических материалов смачивались маслом. Смазывание таких вкладышей осуществляется в процессе работы за счёт масла, которое удерживается порами в поверхности детали. В процессе получения заготовок формирование структуры материала полностью контролируется, в результате полученный материал обладает требуемой техническим регламентом пористостью и шероховатостью. Окончательные геометрические параметры антифрикционных вкладышей и втулок достигаются в результате чистовой механической обработки спеченных заготовок. Как показывают результаты лезвийной обработки, пористая структура поверхностного слоя металлокерамики значительно деформируется и процесс резания сопровождается затягиванием полостей пор деформируемым материалом. Данное явление значительно ухудшает качественные показатели поверхности готовых изделий. Происходит резкое снижение плотности пор на поверхности и в результате невозможно получить нужный эффект самосмазывания узлов трения из таких деталей.

Пористость поверхностного слоя в результате применения лезвийной обработки сокращается по сравнению с первоначальной в 1,7 – 2 раза. С целью повышения пористости поверхности металлокерамических спечённых материалов можно использовать рациональные режимы резания. Установлено, что на изменение пористости при механической обработке существенное влияние оказывают такие факторы, как вид материала применяемого режущего инструмента, скорость резания, величина подачи, глубина резания, геометрические параметры режущего инструмента, наличие и вид применяемой смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС). Таким образом, при исследовании процесса резания бронзографита и железографита установлено, что для пористых металлокерамических материалов с пористостью поверхности 18 – 25 % наиболее рациональным является использование высоких скоростей резания, применение твёрдосплавного инструмента с износостойким покрытием с минимальным радиусом вершины, имеющим минимальное округление режущей кромки. Передний и задние углы режущего инструмента должны находиться в рекомендуемых пределах – соответственно $\gamma = 4-5^\circ$, $\alpha = 7-8^\circ$, подача не должна превышать 0,05 мм/об, глубина резания должна быть минимальной, но не должна быть меньше, чем радиус вершины режущего инструмента. Для чистовой механической обработки металлокерамических спечённых материалов рекомендуется использовать водорастворимые СОТС: Укринол-1М, Велс-1М. В ряде случаев этого может быть достаточно, если полученная пористость поверхности и шероховатость удовлетворяют техническим требованиям, предъявляемым к поверхности изделий пористых металлокерамических материалов.

Пористость и шероховатость поверхности готовых изделий указываются в сертификате качества продукции и являются основополагающими показателями качества поверхности для антифрикционных вкладышей и втулок. В некоторых случаях после чистовой механической обработки удаётся достигнуть нужной пористости поверхности, но при этом не достигается требуемая шероховатость. Применение СОТС при механической обработке позволяет воздействовать на варьирование пористости и шероховатости поверхности. Наиболее эффективным способом для получения требуемых параметров качества поверхностного слоя деталей из пористых металлокерамических материалов является комбинированная механоэлектрохимическая обработка с СОТС [2]. Химическая обработка заключается в интенсивном действии на обрабатываемую поверхность добавляемого в СОТС водного раствора сульфата меди (II), концентрация химического реактива и пропорциональное соотношение этого реактива к СОТС зависит от режимов резания, марки обрабатываемой пористой металлокерамики, от характера воздействия режущего инструмента на обрабатываемый материал.



Рисунок – Принципиальная схема установки для комбинированной электрохимической обработки

Электрическая цепь замыкается через струю химически активного раствора, попадающую из ёмкости с анодом в зону резания. В качестве анода служит поверхность обрабатываемой пористой металлокерамики, в качестве катода используется металлический стержень, помещённый в ёмкость с химически активным раствором. Величина тока и напряжения зависит от режимов резания, марки обрабатываемой металлокерамики, от вида материала инструмента и его геометрических параметров. Подключение анода к источнику питания лучше осуществлять посредством динамического токосъёмного устройства, контактирующего непосредственно с обрабатываемой заготовкой. Режущий инструмент желательно исключить из электрической цепи, так как при его износе изменяется сопротивление цепи, а также во избежание разрушения защитного износостойкого покрытия из-за действия электрического тока.

Применение данного комплекса механической обработки и электрохимической активации СОТС позволяет предотвратить затягивание пор и получить поверхностную пористость, соответствующую пористости заготовок при спекании, а также шероховатость, отвечающую техническим требованиям качества продукции.

Список использованных источников: 1.Бабич Б.Н., Вершинина Е.В., Глебов В.А. Металлические порошки и порошковые материалы. Справочник. – М.: ЭКОМЕТ, 2005. – 520 с. 2.Илюзнецов В.Е., Куликов М.Ю. Исследование влияния условий чистовой механической обработки металлокерамических спечённых материалов на качество обрабатываемой поверхности. Междисциплинарный сборник научных трудов «Физика, химия и механика трибосистем» Ивановского государственного университета. Трибологический центр ИвГУ. Выпуск Х. Иваново 2011. С. 88 - 93.

Поступила в редакцию 15.06.2012

С.Н. Лавриненко, д-р техн. наук, Харьков, Украина

ВЛИЯНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО МАТЕРИАЛА И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА КАЧЕСТВО БИОИНЖЕНЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРОВ

У статті представлені результати дослідження впливу марки інструментального матеріалу і геометричних параметрів ріжучого інструмента на якість поверхневого шару і стабільність експлуатаційних характеристик біоінженерних полімерних виробів.

В статті представлені результати дослідження впливу марки інструментального матеріалу і геометричних параметрів ріжучого інструмента на якість поверхневого шару і стабільність експлуатаційних характеристик біоінженерних полімерних виробів.

The paper presents the results of investigation of the effect of tool material mark and geometric parameters of the cutting tool on the quality of the surface layer and the stability of the performance of bioengineered polymer products.

Влияние инструментального материала и геометрических параметров режущего инструмента на качество поверхности и стабильность эксплуатационных характеристик бионженерных полимеров

Влияние инструментального материала на качество формируемого поверхностного слоя бионженерных изделий из полимеров определяется физико-химическим взаимодействием инструментального и обрабатываемого материалов. Низкая твердость полимеров, а также характер их деформации и разрушения в процессе резания, предполагает кинематическое копирование аморфным обрабатываемым материалом поверхностной структуры инструментального материала. Таким образом, инструментальный материал, обладающий более упорядоченной поверхностной структурой и, следовательно, минимальной шероховатостью режущей кромки, будет обеспечивать стабильно высокое качество обработанной поверхности. Причем упорядоченность этой структуры должна сохраняться возможно более длительное время, а сама поверхность – обладать низкими адгезионными свойствами, предотвращающими налипание частиц обрабатываемого материала и связанные с этим нарушения поверхностного слоя.

В результате исследований по определению износостойкости режущего инструмента был сделан вывод, что из инструментальных материалов наиболее полно изложенным выше требованиям отвечает природный монокристалл алмаза и группа алмазных сверхтвёрдых материалов, в частности, инструментальный материал марки СКМ-Р, обладающий мелкозернистой структурой.

Инструменты из быстрорежущих сталей обладают наименьшим значением радиуса округления режущей кромки из всех групп инструментальных материалов, однако это достоинство нивелируется низкой способностью

удерживать минимальное значение радиуса округления в течении длительного времени, а также более высокими адгезионными свойствами поверхности быстрорежущей стали по сравнению с СТМ. Режущие инструменты из твердых сплавов в частности группы ВК вследствие пористости структуры, больших значений радиуса округления режущей кромки по сравнению с быстрорежущей сталью и СТМ при обработке полимеров неэффективны.

На рисунке 1 представлена столбчатая диаграмма, отражающая значения шероховатости обработанной поверхности по параметру среднеарифметического отклонения профиля при чистовом фрезеровании на оптимальных режимах резания ($v = 30$ м/мин, $sz = 0,01$ мм/зуб, $t = 0,3$ мм) режущим инструментом из различных инструментальных материалов, имеющим оптимальную геометрию ($\phi = 45^\circ$; $\phi_1 = 10^\circ$; $\alpha = 12^\circ$; $\alpha_1 = 10^\circ$; $\gamma = 0^\circ$). Как видно из столбчатой диаграммы минимальный уровень шероховатости достигается при использовании СТМ марки СКМ-Р: $Ra = 1,9 \dots 2,1$ мкм. Следует отметить, что другие марки сверхтвёрдых материалов по сравнению с СКМ-Р обеспечивают худший уровень шероховатости (см. рис. 2).

Учитывая относительно высокую стоимость СТМ, а также ограниченную длину главной режущей кромки из-за ограниченного размера синтезируемого поликристалла можно рекомендовать СТМ марки СКМ-Р для операций полуставового и чистового фрезерования полимеров; а на операциях чернового фрезерования использовать быстрорежущую сталь марки Р6М5, как наиболее широко распространенную и удовлетворяющую комплексу технологических требований.

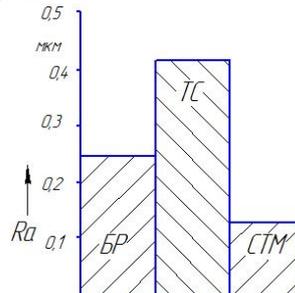


Рисунок 1 – Влияние различных инструментальных материалов на шероховатость обработанной поверхности ПОЛИМЕРОВ

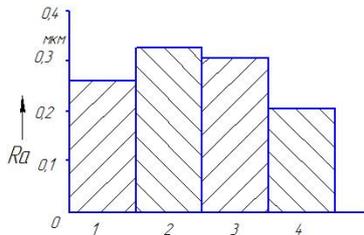


Рисунок 2 – Шероховатость обработанной поверхности ПОЛИМЕРОВ при фрезеровании инструментом из различных СДМ:
1 – композит 01, 2 – композит 05, 3 – композит 10, 4 – СКМ-Р.

Установленное нами положение об определяющей роли радиуса округления режущей кромки в процессе формирования поверхностного слоя изделий из полимеров полностью подтверждается результатами экспериментов по определению влияния геометрических параметров режущего инструмента на параметр радиационной стойкости (рис. 3).

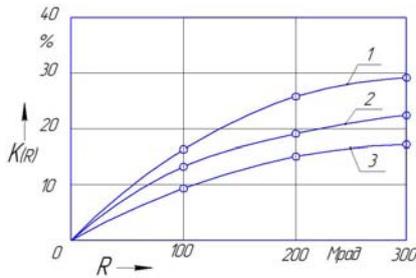


Рисунок 3 – Зависимость показателя потери радиационной стойкости (интенсивности полосы поглощения 1666 см⁻¹ от поглощенной дозы) образцов, обработанных инструментом с различным радиусом округления режущей кромки:
1) $\rho = 11$ мкм, 2) $\rho = 7$ мкм, 3) $\rho = 4$ мкм

Из сопоставления зависимости интенсивностей полос поглощения $S=0$ – группы 1686 см⁻¹ от поглощенной дозы следует, что чем меньше радиус округления режущей кромки инструмента, тем ниже показатель потери радиационной стойкости образцов.

ционной стойкости обработанной поверхности. Это объясняется уменьшением напряженности процесса деформации и стружкообразования в снимаемом слое обрабатываемого материала за счет снижения уровня энергии разрушения.

Варьирование геометрическими параметрами режущей части инструмента в рекомендуемых пределах их значений заметного влияния на эксплуатационные характеристики полимеров не оказывает за исключением диапазона значений переднего угла $\gamma = -5^\circ \dots +10^\circ$ и радиуса при вершине реза $r = 0,05 \dots 6$ мм.

Влияние переднего угла на формирование структуры поверхностного слоя объясняется особенностями процесса деформации и стружкообразования при резании полимеров. Как видно из рисунка 4 интенсивность полос поглощения $S=0$ – группы 1680 см⁻¹ от поглощенной дозы меньше при значении переднего угла $\gamma = 10^\circ$, т.е. при этом значении радиационная стойкость наибольшая. Отрицательное и нулевое значение переднего угла приводит к снижению радиационной стойкости образца и, как следствие, к необратимому ухудшению эксплуатационных характеристик.

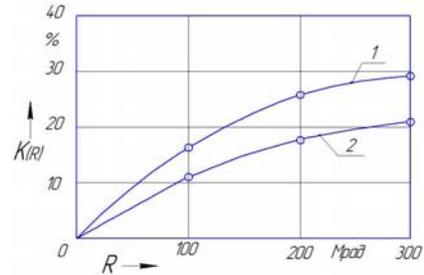


Рисунок 4 – Зависимость показателя потери радиационной стойкости (интенсивности полосы поглощения 1686 см⁻¹ от поглощенной дозы) образцов, обработанных инструментом с различным передним углом:
1) $\gamma = -5^\circ$, 2) $\gamma = +10^\circ$.

Аналогичные результаты получены и в экспериментах по определению влияния переднего угла на показатель светового выхода готового изделия (рис. 5).

Изменение значения радиуса при вершине режущего клина заметно влияет на шероховатость обработанной поверхности. Как видно из рисунка 6 зависимость величины среднеарифметического отклонения профиля от увеличения радиуса при вершине отчетливо проявляется при увеличении глуби-

ны резания. При значениях $t > 0,5$ мм и $r > 2$ мм высота микропрофиля обработанной поверхности достигает такой величины ($Ra > 0,4$ мкм), при которой нарушается соблюдение критериев достаточной шероховатости и регулярности микрогеометрии поверхности и, как следствие, происходит снижение параметров светопропускания. Влияние радиуса при вершине режущего клина на изменение параметров шероховатости поверхности происходит не за счет кинематического отображения режущей части инструмента (для металлов и реактопластов увеличения радиуса при вершине реза обычно приводит к уменьшению шероховатости поверхности), а за счет ухудшения условий процесса деформации и стружкообразования вследствие увеличения площади активного контакта, приводящего к деструктивному поверхностному слою полимеров. Увеличение главного заднего угла до значения $\gamma = 20^\circ$, уменьшение глубины резания $t = 0,1 \dots 0,3$ мм и наличие СОТС позволяет использовать кинетические преимущества инструмента с большими значениями радиуса при вершине ($r = 6 \dots 15$ мм) на чистовых калибрующих операциях, улучшая световой выход готовых изделий, однако это улучшение нивелируется уменьшением радиационной стойкости образцов.

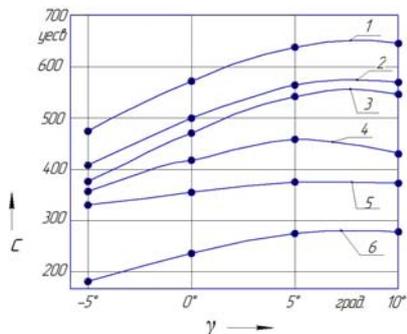


Рисунок 5 – Влияние значения переднего угла режущего инструмента на показатель светового выхода образцов из полимеров различной структуры:
1) $t = 0,1$ мм, 2) $t = 0,2$ мм, 3) $t = 0,3$ мм, 4) $t = 0,4$ мм, 5) $t = 0,5$ мм.

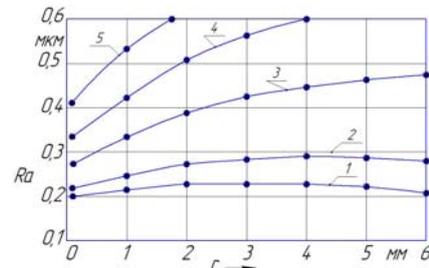


Рисунок 6 – Влияние радиуса при вершине режущего клина на шероховатость обработанной поверхности при различной глубине резания:
1) $t = 0,1$ мм, 2) $t = 0,2$ мм, 3) $t = 0,3$ мм, 4) $t = 0,4$ мм, 5) $t = 0,5$ мм

Таким образом, применение инструмента с большими значениями радиуса при вершине целесообразно в случае, когда с целью увеличения производительности процесса механической обработки возникает необходимость увеличения значения минутной подачи. Для этого случая нами разработана конструкция многозубой торцевой фрезы с использованием принципа разделения припуска и наличием одного или двух калибрующих ножей. Такая конструкция позволяет повысить производительность процесса чистового фрезерования поверхностей крупногабаритных биоинженерных изделий из полимеров типа сцинтилляционных детекторов в 1,5...3,5 раза.

Выводы:

1) Применение инструмента из СДМ марки СКМ-Р позволяет достигать наименьший уровень шероховатости. С учетом относительно высокой стоимости и ограниченной длины главной режущей кромки из-за ограниченного размера синтезируемого поликристалла можно рекомендовать СКМ-Р для операций чистового и получистового фрезерования, а на черновых операциях использовать быстрорежущую сталь марки Р6М5 как наиболее распространенную и удовлетворяющую комплексу технологических требований;

2) При нулевом и отрицательных значениях переднего угла происходит ухудшение эксплуатационных характеристик готовых биоинженерных изделий. Оптимальным значением переднего угла является $\gamma = 5^\circ$.

Н.Ю. Ламнауэр, Харьков, Украина

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ

Запропонована модель розподілу розмірів виробів з різною формою та з будь-яким номінальним розміром в полі допуску. Отримана формула для визначення оптимальної настройки станка і решен ряд практичних задач, пов'язаних з точністю виготовлення виробу

Ключові слова: точність, модель, оцінка, брак.

Предложена модель распределения размеров изделий с различной формой и с любым номинальным размером в поле допуска. Получена формула для определения оптимальной настройки станка и решен ряд практических задач, связанных с точностью изготовления изделия.

Ключевые слова: точность, модель, оценка, брак.

A model of the size distribution of products with different shape and with any nominal size of the tolerance. A formula for determining the optimal settings the machine and solved a number of practical problems associated with precision manufacturing.

Keywords: accuracy, model, evaluation, defect.

Введення. Размеры деталей машин, приобретенные при обработке, определяют зазоры и натяги в соединениях, технические параметры изделий, влияющих на качество, надежность и экономические показатели производства. Поэтому необходимо уделять особое внимание величине размеров деталей машин. Исходя из конструктивных соображений, конструктор задает номинальное значение k_0 , а также нижнее ei и верхнее es предельные стандартные значения размеров изделия. Во многих случаях номинальное значение не совпадает с серединой поля допуска [1]. Тем не менее, при несимметричном расположении поля допуска относительно номинального значения параметра, принимают его среднее значение, т.е. считают, что $k_0 = (ei + es) / 2$. Данное допущение для точной обработки деталей машин приводит к некоторому количеству бракованных изделий, что оказывает влияние на экономические показатели производства. Поэтому возникла задача: « На какой размер необходимо настроить станок, чтобы исключить полученный брак и улучшить качество изделия? Как оценить качество оборудования и саму величину брака? »

Модель распределения размеров. При изготовлении деталей машин точность размеров зависит от некоторого числа известных и неизвестных технологических факторов, которые влияют на точность обработки. Поэтому величина размеров X имеет вероятностный (стохастический) характер. Очевидно, что величина размеров должна быть физически ограниченной величиной, т.е. иметь нижний и верхний порог. Существующие вероятностно-статистические методы анализа точности обработки изделия, используют, в основном, усеченное нормальное распределение с вероятностью выхода раз-

меров за границы поля рассеяния 0,0027. При этом не вводят параметры усечения.

Прделанные профессором А. А. Маталиным исследования показали, что при высокой точности необходимо применять для величины размеров распределение Симпсона или равномерное распределение в зависимости от качества точности изготовления [3]. Предлагается модель погрешности размеров в виде:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \notin (b, c), \\ \frac{1+k}{c-b} \left[1 - \left(\frac{x-a}{b-a} \right)^k \right] & \text{при } x \in [b, a], \\ \frac{1+k}{c-b} \left[1 - \left(\frac{x-a}{c-a} \right)^k \right] & \text{при } x \in (a, c), \end{cases} \quad (1)$$

где a – номинальный размер, b – нижний порог и n – верхний порог размера, k – параметр формы размеров.

Функция распределения для модели (1) имеет вид:

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq b \\ \left\{ x-b+k(x-a) \left[1 - \left(\frac{x-a}{b-a} \right)^k \right] \right\} / (c-b) & \text{при } b < x \leq a \\ \left\{ x-b+k(x-a) \left[1 - \left(\frac{x-a}{c-a} \right)^k \right] \right\} / (c-b) & \text{при } a < x \leq c \\ 1 & \text{при } x > c \end{cases} \quad (2)$$

Проведенный статистический анализ на массовых испытаниях по распределению размеров показал, что данная модель хорошо согласуется с экспериментальными данными и такая чувствительная характеристика к распределению как λ - характеристика [4] $\lambda = f(x)/(1 - F(x))$ данного распределения практически совпадает с эмпирическими значениями λ - характеристики. Это значит, что данная модель (1) практически адекватна к истинной модели и может быть применима для решения практических задач. При частных значениях параметров модель (1) переходит в распределение Симпсона или в равномерное распределение.

Математическое ожидание плотности распределения (1) имеет вид:

$$M(X) = (b + c + 2ka + kb + kc) / (4k + 2) \quad (3)$$

Из (2) видно, что математическое ожидание зависит от параметра формы k .

Для различных параметров формы $0 < k \leq 1$ получаем различные плотности распределения, которые имеют форму от треугольной до равномерно

распределенной при $k \rightarrow 0$ (см. рис. 1). На рис. 1. $a = 2, b = 1, c = 4$, для $k = 1$ $M(X) = 2, (3)$, а для $k = 0,005$ $M(X) = 2,49752475$.

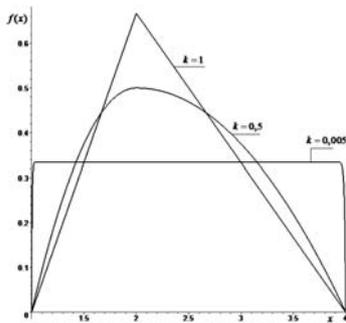


Рисунок 1 – Кривые плотности распределения размеров при различных параметрах формы k .

Обычно погрешность обработки для каждого станка известна, поэтому можно указать и границы допусков для станка при настроенном процессе, а, значит, найти форму размеров k . Эту форму необходимо иметь для настройки станка, так как величина размера настройки станка определяется математическим ожиданием (2). Эту форму можно найти, приравнявая математическое ожидание к среднему значению \bar{X} размеров, полученных при массовых испытаниях обработки изделий.

$$k = (2\bar{x} - c - b) / (2a + b + c - 4\bar{x}) \quad (4)$$

Таким образом, если известна форма распределения размеров k при заданных допусках на номинальный размер, то настройка станка осуществляется по формуле (2). Только в случае равномерного распределения размеров настройка станка осуществляется на середину поля допуска.

Так как область изменения случайной величины размера X ограничена слева и справа ($b \leq X \leq c$), то для определения доли брака нужно определить расположение поля допуска 2δ и поле рассеяния размеров 2Δ . Если поле допусков задается, то поле рассеяния находится из проведенных исследований. Чтобы найти поле рассеяния $2\Delta = b - c$, нужно уметь находить оценки параметров модели (1) по результатам экспериментов.

Оценки параметров модели рассеяния размеров. Модель (1) имеет три параметра b, c, k и одно известное номинальное значение a . Для оценки параметров модели (1) применим предложенный метод в [5] с изме-

нениями его для трех параметров и с использованием формулу (4). Найдем математические ожидания порядковых статистик выборки объема два $\mu_{1,2}, \mu_{2,2}$ [6].

$$\mu_{2,2} = 2 \int_b^c xf(x)F(x)dx = (-6k^3a^2 - 20k^3c^2 + 7cbk^3 + 7k^3b^2 - 21k^3ac + 33k^3ab - 21k^3ac - 38k^3c^2 - 6k^3a^2 + 16k^2cb + 16k^2b^2 + 33k^2ab + 6kab + 11kcb - 6kac + 11kb^2 - 22kc^2 - 4c^2 + 2b^2 + 2cb) / (3(1 + 5k + 6k^2)(3k + 2)(b - c) \quad (5)$$

$$\mu_{1,2} = 2 \int_b^c xf(x)(1 - F(x))dx = -(7k^3c^2 - 47cbk^3 + 34k^3b^2 + 33k^3ac - 21k^3ab - 6k^3a^2 + 33k^2ac + 18k^2c^2 - 6k^2a^2 - 65k^2cb + 43k^2b^2 - 21k^2ab - 6kab - 28kcb + 6kac + 17kb^2 + 11kc^2 + 2c^2 + 2b^2 - 4cb) / (3(1 + 5k + 6k^2)(3k + 2)(b - c) \quad (6)$$

Подставляя в (5) и в (6) вместо параметра формы k выражение (4) с заданным числом $a = k_0$, получаем два выражения $\mu_{1,2}, \mu_{2,2}$ с двумя неизвестными: b и c . Эти неизвестные найдем из системы уравнений

$$\begin{cases} \mu_{1,2} = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i=0}^{n-2} (n-1-i)x_{(i+1)}, \\ \mu_{2,2} = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i=0}^{n-2} (1+i)x_{(i+2)}, \end{cases}$$

где $x_{(i)}$ – i -тая порядковая статистика выборки объема n .

Проведенное статистическое моделирование при объемах выборки $n=15$ показало, что оценки, полученные этим методом, близки к заданным значениям. Отсюда следует, что этот метод применим для оценки параметров b, c и k модели (1). В системе MAPLE разработана программа, позволяющая находить оценки параметров модели (1) b, c и k .

Оценка величин брака. Любой процесс изготовления деталей или изделия обязан учитывать экономическую эффективность выпускаемой продукции. Величина процента брака, а также выбранного излишне точного оборудования может значительно влиять на экономическую эффективность производства. Поэтому оценка величины брака и нахождение поля рассеяния размеров деталей или изделий имеет большое значение на производстве.

Полученная разность $c_1 - b_1$ оценок параметров модели (1) служит оценкой поля рассеяния размеров изделий, а сами оценки b_1 и c_1 определяют место расположения относительно заданных значений ei и es . На рис. 2. представлены расположения оценок b_1 и c_1 .

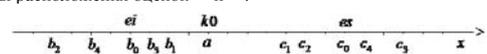


Рисунок 2 – Взаиморасположение оценок b_i и c_i модели (1)

РАБОТОСПОСОБНОСТЬ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ С ВОДОРАСТВОРИМЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ ПРИ ОБРАБОТКЕ СТЕКЛОИЗДЕЛИЙ

У статті представлені результати випробувань алмазних кругів на зв'язках з різними композиційними наповнювачами на базі високоплавкого легкоплавкого скла при шліфуванні кристалю, розглянуті механізми і кінетика зношування робочих поверхонь кругів форм ІЕЕ1.

В статье представлены результаты испытаний алмазных кругов на связках с различными композиционными наполнителями на базе высокоплавкого легкоплавкого стекла при шлифовании хрусталя, рассмотрены механизмы и кинетика изнашивания рабочих поверхностей кругов форм ІЕЕ1.

The paper presents the results of testing the diamond disks with binders and various fillers based on high-filled low-melting glass when grinding crystal glass. It also considers the mechanisms and kinetics of wear-out of operating surfaces of ІЕЕ1-shape disks.

При обработке изделий из художественного стекла (хрусталя) используется, в основном, алмазный инструмент форм ІЕЕ1, І4ЕЕ1, ІFF1 на металлических связках марок М2-01, М3-01, М6-14 и др. Реже применяется инструмент на органических или керамических связках. Работоспособность инструмента определяется маркой, зернистостью и концентрацией алмазного порошка и связкой. Причем свойства связки чаще определяют работоспособность в конкретных условиях, производительность, удельный расход алмазов и качество обработанных поверхностей [1,2]. Для изготовления алмазного инструмента, применяемого при обработке стеклоизделий, обычно применяют шлифпорошки из синтетических алмазов марок АС6-АС15 узких фракций, причем особое внимание уделяется расцветке порошков, так как наличие предельных фракций в таком инструменте ухудшает качество обработки и резко увеличивает затраты на химическое полирование.

Удаление обрабатываемого материала при шлифовании стекла происходит в результате хрупкого разрушения [3-5]. Повышенная хрупкость стекол и ряда других хрупких неметаллических материалов характеризуется большой разностью пределов прочности при растяжении и сжатии. В то же время указанные материалы обладают практически идеальной упругостью. При двухосном сжатии стекол соблюдается линейная зависимость между напряжениями и деформациями вплоть до разрушения, а материал подвергается воздействию конкурирующих процессов микроскопического разрушения и упрочнения структуры [4-6].

В процессе обработки стекла его поверхностный слой разрушается под воздействием абразивных зерен. Под вершинами зерен возникают области

Если $ei = b_0$ и $es = c_0$, то имеется идеальный случай изготовления изделий. Интервал $(b_1; c_1)$ говорит о том, что брака нет, но может быть выбрано оборудование излишне точное. Оценки b_2 и c_2 говорят о том, что есть неустраняемый брак, вероятность которого определяется по формуле (2)

$$P(b_2 < x \leq ei) = ei - b_2 + k(ei - a) \left[1 - \left(\frac{ei - a}{b_2 - a} \right)^k \right]$$

Оценки b_3 и c_3 дают устранимый брак, вероятность которого определяется по формуле

$$P(es < x \leq c_3) = c_3 - es - k(es - a) \left[1 - \left(\frac{es - a}{c_3 - a} \right)^k \right]$$

Интервал $(b_4; c_4)$ говорит о том, что имеется устранимый и неустраняемый брак, вероятность которого определяется по формуле

$$P(es < x \leq c_4) + P(b_4 < x \leq ei) = c_4 - es - k(es - a) \left[1 - \left(\frac{es - a}{c_4 - a} \right)^k \right] + ei - b_4 + k(ei - a) \left[1 - \left(\frac{ei - a}{b_4 - a} \right)^k \right]$$

Выводы:

1. Предложенная модель (1) размеров изделий практически адекватна имеющимся размерам изделий, полученных экспериментально.
2. Модель (1) имеет различную форму распределения k и различное расположение номинального размера в поле допуска.
3. Разработан достаточно точный метод получения оценок параметров модели (1).
4. С помощью данной модели (1) и полученных оценок ее параметров определяется установочный размер для обработки изделия с наилучшим значением.
5. Получены формулы, определяющие вероятность устранимого и неустраняемого брака, и определения поля рассеяния размеров.

Список использованных источников: 1. ГОСТ 25347-82. ЕСПД. Поля допусков и рекомендуемые посадки. [Текст]. — Введ.1983-01-07. — М.: Изд-во стандартов, 1983. — 27 с. 2.ГОСТ 25346-89 ЕСПД. Общие положения, ряды допусков и основных отклонений. [Текст]. — Введ.1990-01-07. — М.: Изд-во стандартов, 1990. — 25 с. 3. Маталин А.А. Технология машиностроения: Учебник для машиностроительных вузов по специальности «Технология, металлорежущие станки и инструменты». [Текст] / А.А. Маталин -Л.: Машиностроение, 1985. 496с. 4. Ламнауэр Н.Ю. Технологическое обеспечение качества соединений по параметру биния [Текст] / Н.Ю. Ламнауэр // Вестник Национального технического университета «ХПИ». -2005. -Вып.57. -С.56-61. 5. Ламнауэр Н.Ю. Экономический вопрос выбора технологии финишной обработки изделий в машиностроении [Текст] / Н.Ю. Ламнауэр // Вестник Национального технического университета «ХПИ». -2008. -Вып.1. -С.113-120. 6. Дейвидт Г. Порядковые статистики [Текст]: пер. с англ. под ред. В.В.Петрова; - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. -336с.

Поступила в редакцию 15.06.2012

напряжения сжатия, а ниже – растяжения. Когда значение напряжения под острием зерна достигает предела текучести стекла, в областях размером 100 мкм и более имеет место хрупкое разрушение с одновременной пластической деформацией. То есть, проникающее действие острия зерна вызывает пластическую деформацию, а внутренние напряжения растяжения приводят к хрупкому микроразрушению и диспергированию поверхности стекла. При давлении 5000 – 6000 МПа начинается вязкое течение стекла и пластическая деформация в областях менее 100 мкм. Таким образом, хрупкое разрушение под вершинами зерен определяет энергию разрушения и эффективность снятия припуска при шлифовании стекла, а деформация в прилегающих микрообъемах является сопутствующим фактором при диспергировании стекла.

Считается, что алмазные зерна используют в шлифовальных инструментах небольшую часть своих потенциальных возможностей. Уровень их использования может быть повышен при увеличении прочности удержания зерен связкой на границе их раздела и обеспечения величины выступления зерен из связки, большей глубины их врезания для образования необходимого пространства, в котором распределяются обрабатываемый материал и продукты его диспергирования. Технологические процессы изготовления режущих композиционных материалов методами порошковой металлургии включают несколько основных операций: смешивание компонентов шихты связки, смешивание компонентов алмазосодержащей шихты, холодное прессование брикета алмазосодержащей шихты, спекание и горячее прессование брикета [6-8]. Шихта инструментов для обработки стекла состоит, как правило, из связующих на основе систем Cu-Zn (Cu-Zn, Cu-Zn-Sn), алмазного порошка и наполнителей. При спекании и горячем прессовании брикета формируется матрица композиционного материала, обеспечивающая закрепление (удержание) режущих элементов – алмазных зерен. Как правило, матрица формируется на операции спекания (частично горячего прессования) при взаимодействии дискретных, дисперсных металлических, керамических или стеклянных частиц, образующих монолитный материал. Свойства матрицы могут варьироваться изменением пористости и состава за счет введения различного рода наполнителей. В качестве наполнителей режущих композитов используются дисперсные и ультрадисперсные частицы инертных по отношению к матрице материалов, например SiC, SiO₂, B₄C, графит и т.д. [7-8]. Традиционно основными функциями наполнителей является повышение эксплуатационных характеристик алмазосодержащих композиционных материалов (коэффициента трения, износостойкости, алмазодержания) и механических характеристик (твердости, предела прочности). Полагая, что придание наполнителям режущих функций с улучшением процесса самозатачивания и одновременно флюсоующих агентов позволит повысить рабочие характеристики алмазосодержащих композитов и инструмента на их основе. Решением может быть использование дисперсных частиц B₄C, SiC и подобных в качестве наполни-

телей химически нестойких стекол с низкими температурами перехода в вязко-пластичное состояние, что позволит реализовать их абразивные свойства, снизить степень «засаливания» связки и, одновременно повысить твердость и прочность связки.

В качестве основы легкоплавких стекол использовали борный ангидрид, в качестве легирующих компонентов – SiO₂, P₂O₅, Na₂O. В качестве наполнителей использовали порошки B₄C, SiC, а также алмаза зернистостью 20/14 – 1/0 и 60/40. Концентрация наполнителей в таких композиционных материалах варьировала от 75 до 50 % об.

Композиционные материалы систем SiC – B₂O₃, B₄C – B₂O₃, (SiC – алмаз – B₂O₃, (B₄C – алмаз) – B₂O₃ получали прямым синтезом при взаимодействии борной кислоты, аморфного оксида кремния и дигидрофосфата натрия в условиях одновременной дегидратации борной кислоты при 875 – 925 К в течение часа. Спекти дробили и рассеивали по фракциям. Отдельные результаты испытаний на прочность гранул приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Влияние концентрации B₂O₃ на прочность частиц композиционного материала B₄C – B₂O₃ и (B₄C + алмаз 10 % об.) – B₂O₃ зернистостью 100/80 мкм

Материал	Концентрация B ₂ O ₃ в композиционном материале, % об.	Разрушающая нагрузка, Н	Среднее значение из 25 гранул	Прочность, МПа
B ₄ C – B ₂ O ₃	50	60...340	166,4	1,7
	40	60...390	223,2	2,2
	25	70...500	183,6	1,8
B ₄ C + алмаз – B ₂ O ₃	50	60...450	244	2,4
	40	70...460	188,4	1,9
	25	90...620	280,8	2,8

Анализ результатов показывает, что во всех системах B₄C – B₂O₃, SiC – B₂O₃, (SiC – алмаз) – B₂O₃, (B₄C – алмаз) – B₂O₃ снижение объемного содержания легкоплавкого стекла приводит к повышению прочности композиционных гранул. Величина нагрузки, при которой происходит разрушение частиц, определяется составом, структурой частиц и их формой. Среднее значение этих величин достаточно адекватно отражает прочностные характеристики частиц композиционных материалов. Увеличение числа частиц с высокими показателями прочности при одновременном увеличении средней величины показателей по мере снижения концентрации стекла в композиционном материале позволяет полагать, что снижение концентрации (объемной) матричного материала приводит к увеличению прочности частиц B₄C – B₂O₃. Низкие значения прочности частиц могут свидетельствовать также об их де-

фектной структуре. Формирование такой структуры может происходить на стадиях приготовления стекла или стадии дробления.

На рисунке 1 приведены отдельные результаты исследования композиционных частиц.

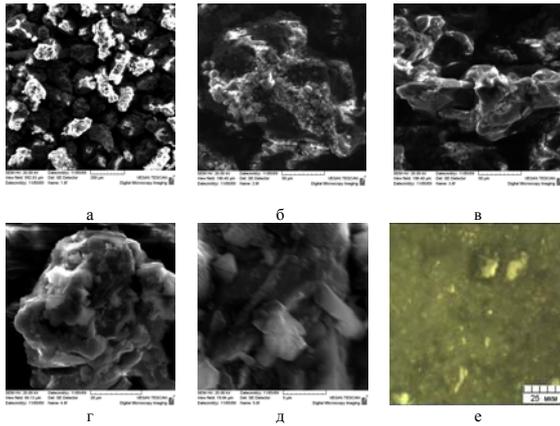


Рисунок 1 – Строение гранул ($B_4C + ACH\ 7/3 - B_2O_3$ зернистостью 160/100 мкм: а- общий вид, б, в- морфология гранул; г, д – морфология поверхности гранул; е- микроструктура

В связке алмазного инструмента композиционные гранулы могут играть роль как режущего элемента, так и связующего. Анализ морфологии и строения поверхности гранул, полученных при дроблении спеков, показал, что на их поверхностях расположены частицы алмаза (карбидов бора или кремния). Т.е. при дроблении не происходит разрушения абразивных частиц, а они прочно удерживаются матрицей (рисунок 1 в, д). В области концентраций B_2O_3 60 – 70 % об. в системах $B_4C - B_2O_3$, $SiC - B_2O_3$, $(B_4C - алмаз) - B_2O_3$, после спекания и охлаждения суспензий формируются композиционные материалы с достаточно однородным распределением частиц твердой фазы. Значительные различия в прочности композиционных материалов могут быть связаны с межчастичным взаимодействием между расплавом и частицами B_4C , SiC , алмаза, либо неравномерным распределением расплава в композиционном материале. В образцах с объемным содержанием B_2O_3 в матрице 50 % отмечаются участки с более высокой концентрацией наполнителя. Причи-

ной неравномерного распределения дисперсных частиц в матрице является сегрегация и седиментация твердой фазы при выдержке стекляннй суспензии. Неоднородное распределение дисперсных частиц в расплаве вызвано различной вязкостью расплава из-за низких скоростей смешения и растворения компонентов стекла (дисперсного оксида кремния). Сегрегация дисперсных частиц на стадии смешивания и плавления компонентов стекла приводит к образованию пор. В области 40 % об. концентрации B_2O_3 распределение дисперсных частиц в матрице более однородное. Тем не менее, отдельные поры существуют и в гранулах с концентрацией B_2O_3 40–25 % об. Дробление таких спеков с неравномерным распределением при однократном ударе бойка (либо однократном цикле дробления на прессе при давлении 100 МПа) не приводит к массовому дроблению частиц размером 2000–1000 мкм. Для получения гранул различной зернистости проводили размол дробленных спеков в шаровой мельнице. Исследования показали, что гранулы фракций 50/63-160/100 спекаются уже при 875 К. Образование монолитного композита происходит при давлении горячего прессования от 3–5 МПа. Причиной этого является переход матричного материала (стекла) в интервале температур изготовления алмазосодержащих композиционных материалов в пластичное и вязко-пластичное состояние, что и приводит к усадке и массовому образованию контактов между гранулами. В таблице 2 представлены характеристики композиционных материалов, полученных при спекании и горячем прессовании гранул при концентрации $B_2O_3 - 50$ об.%, $SiC - 25$ об.%, алмаз АСН 7/3 – остальное. Давление горячего прессования 10 МПа.

Таблица 2

Зернистость гранул	Твердость, HRB		
	Температура спекания, К		
	875	925	975
63/50	29,3	30,1	30,6
80/63	27,4	30,5	31,1
160/100	30,8	34,7	36,4

При исследовании влияния концентрации полученных композиционных наполнителей (гранул) на прочность композиционных материалов на медно-оловянной основе установлено, что введение гранул в металлическую матрицу сопровождается при прочих равных условиях, увеличением твердости и прочности композиционного материала. В отличие от гранул, частицы микропорошков (АСН 3/7, карбида кремния) при их введении в металлическую матрицу в свободном состоянии, образуют конгломераты, в которых отсутствуют контакты частиц с матричным материалом (рисунок 2). Дисперсные частицы блокируют частицы меди и олова, снижая степень взаимодействия между компонентами (рисунок 2 в, г).

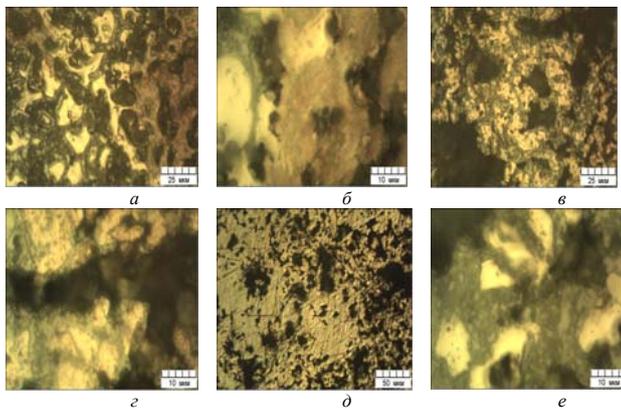


Рисунок 2 – Композиционные материалы $Si\ 80$ мас. % - Sn – наполнитель. Температура спекания 1000 К, давление горячего прессования 30 МПа: а, б, в – распределение наполнителя из микропорошка АСН 7/3, б – прослойки оловянно-медного сплава между конгломератами АСН 7/3; в – участки скопления частиц АСН 7/3 в матрице; г, д, е - наполнитель гранулы (15 мас. %, е - 5 мас. %) $V_2O_5 - ACH\ 7/3 -$ карбид бора 5/3.

Алмазные (абразивные) зерна связаны стеклом в гранулу, которая в процессе шлифования как более твердая частица, выступает из металлической матрицы. Границы гранулы с матричным материалом не четкие, размытые, что свидетельствует о деформации гранул при горячем прессовании (рисунок 2 г). Частицы абразивов в грануле выступают из стекла и играют роль отдельных режущих элементов (рисунок 2 д, е). В отличие от композиционных материалов содержащих отдельные частицы абразивов (АСН 7/3, карбид кремния), абразивные частицы, объединенные в гранулы, не препятствуют процессам взаимодействия между компонентами матрицы алмазосодержащего композиционного материала (рисунок 2 г, е). Повышение концентрации гранул в композиционном материале с 15 до 30 мас.% не приводит к изменению характера взаимодействия между компонентами матрицы. Деформация и течение материала гранул при горячем прессовании формируют развитый рельеф на поверхности композиционного материала. Одновременно, формируется и развитая сеть межфазных границ стекло-металл. Это приводит к увеличению твердости композиционных материалов. В таблицах 3,4 приведены

отдельные значения твердости композиционных материалов полученных из шихты связки, содержащей гранулы и органический пластификатор.

Таблица 3 – Твердость композиционных материалов медь – 20 мас.% олово при различной концентрации пластификатора. Зернистость гранул 100/80 мкм. Давление горячего прессования 10 МПа

Марка пластификатора и концентрация, мас. %	Твердость, HRB		
	Температура спекания, К		
	815	925	975
1 полиэтиленполиамин	67,1	72,3	77,8
2 полиэтиленполиамин	69,2	73,4	79,5
1 вазелиновое масло	54,3	65,2	74,6

Таблица 4 – Твердость композиционных материалов медь – 20 мас.% олово – гранулы наполнителя (карбид бора – легкоплавкое стекло) различной концентрации при режимах спекания: 1 стадия 955 К (15 МПа 40 минут), 2-стадия - 995 К (80 минут).

Концентрация наполнителя, об. %	Твердость, HRB							
	Давление второго горячего прессования, МПа							
	30				60			
12	78	80	71	76	82	84	78	76
25	80	86	89	81	83	84	79	73
30	83	82	90	87	85	86	80	83

Результаты испытаний показывают, что использование в качестве пластификатора полиэтиленполиамин повышает твердость композиционных материалов на основе системы медь-олово, изготовленных при пониженных (815 – 975 К) температурах и давлениях (40 – 60 МПа). Введение гранул в шихту, дополнительно повышает твердость композита на 10 – 15 единиц HRB.

Параметры технологических процессов спекания и горячего прессования зависят от объема жидкой фазы и скорости его изменения. В интервале температуры существования жидкой фазы (олова) 500 – 675 К, скорость диффузии олова в медь мала, растворимость меди в олове достаточно высока [6,8], что делает возможным формирование алмазосодержащего слоя, используя низкие давления. Кроме того, в этом температурном интервале происходит термодеструкция пластификатора, а процессы восстановления (окисления), растекания расплава, под действием выделяющихся газообразных продуктов деструкции, завершились. Использование предварительной горячей прессовки на стадии нагрева пресс-формы до температуры отжига (и горячего прессования) позволяет интенсифицировать процессы сплавообразования. Прессование брикета, после нагрева в течение 20 минут до 775 К формирует структуру, указывающую на присутствие в брикете значительного объема жидкой фазы (рису-

нок 3 а). Достаточно большие объемы жидкой фазы присутствуют при 825 К (рисунок 3 б). Снижение объема расплава в брикете фиксируется при 975 К и длительности нагрева 35 минут (рисунок 3 в).

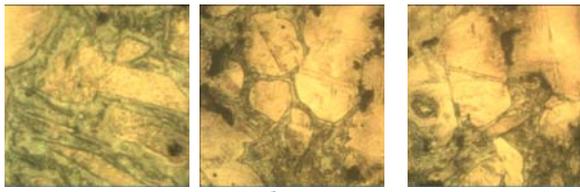


Рисунок 3 – Микроструктура композиционного материала медь – 20 мас. % олово, 10 мас. % гранулы $B_4C - B_2O_3$. Давление горячего прессования 20 МПа. Температура прессования: а – 775 К; б – 825 К; в – 975 К

Двухстадийное прессование позволяет формировать при более низком давлении структуры композиционных материалов, аналогичные получаемым при 1025 – 1045 К и сохранить исходную форму композиционных гранул «карбид бора – стекло». Дисперсные частицы (осколки) стекла, карбида бора со стеклом, несмотря на снижение давления прессования, формируют вторичные, достаточно разветвленные структуры. Эти структуры представляют собой прослойки стекла и карбида бора со стеклом, расположенные между частицами медного сплава и медной эвтектикой.

Твердость композиционных материалов возрастает с увеличением температуры спекания и давления прессования. Двухстадийное спекание и горячее прессование повышают (при прочих равных условиях) твердость композиционных материалов системы карбид кремния – легкоплавкое стекло за счет более полного взаимодействия компонентов композиционного материала. Рост твердости композиционных материалов при увеличении продолжительности спекания на второй стадии, показывает, что на первой стадии спекания взаимодействуют лишь компоненты, имеющие общие контактные поверхности.

На разработанных композиционных материалах изготовлена партия кругов 14EE1 250×8×10×32 - 110° AC6 100/80p 50%, с различными составами связок. Данным инструментом проводилось шлифование хрустальных брусков размерами 200×100×20 мм с содержанием PbO = 24 %. Для проведения испытаний разработан стенд на базе универсально-заточного станка ЗЕ642. На стенде обеспечивается постоянное усилие на круг и компенсируются по-

тери на сопротивление движению в направляющих станка. Испытания эксплуатационных характеристик кругов можно проводить в диапазоне скоростей резания 10-55 м/с, что выше требований ГОСТ 30352. Масса уравнивающего груза подбирается из условия обеспечения перемещения стола без действия на испытываемый образец сил резания. Величина рабочей нагрузки, создающей необходимое тяговое усилие стола для преодоления действия силы резания регулируется в пределах 1-6 кг. Обрабатываемая поверхность образца устанавливается в оснастке параллельно движению стола станка. Круги испытывали с охлаждением водой, подаваемой в зону резания непрерывным поливом с расходом 2-3 л/мин. Состояние поверхностей инструмента оценивали на микроскопах МПБ-2 и БМИ-1, а также исследовали на микроскопе VEGA II TESCAN.

Для каждого круга определялись производительность шлифования Q ($см^3/мин$), удельный расход алмазов q ($мг/см^3$) и время шлифования (время каждого прохода кругом образца из хрустала). Удельный расход алмазов определялся методом взвешивания кругов и образцов до и после испытания. Масса материала образца, снимаемая за испытание, составляла не менее 200 г. Шлифование проводилось по двухпроходной схеме таким образом, что второй проход шел по профилю первой канавки. Глубина шлифования для каждого прохода составляла 2 мм. Длительность обработки по проходам контролировали секундомером и по отметкам на осциллограмме с записью мощности шлифования. Рабочая скорость круга была постоянной и составляла 28,2 м/с.

Результаты и их обсуждение. Отдельные результаты испытаний кругов представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Эксплуатационные характеристики алмазных кругов

№ круга	$q, мг/см^3$		$Q, см^3/мин$	
	1 правка	2 правка	1 правка	2 правка
1	0,167	0,160	17,3	18,1
2	0,145	0,148	18,5	19,7
3	0,152	0,150	17,3	18,2
4	0,154	0,155	16,7	17,8
5 (M2-01)	0,165	0,161	15,3	15,7

На первом этапе для всех кругов характерен ускоренный износ и быстрое округление кромки круга. Время прохода под нагрузкой 4 кг всей длины образца (200 мм) составляло на нечетном проходе 7-9 с, на четном 11-15 с. После 2-3 проходов процесс стабилизируется с показателями 4-5 и 8-9 секунд соответственно.

Производительность шлифования всех опытных и стандартного круга (№5) кругов превышает нормируемый уровень по ГОСТ 30352-96. Вскрытие круга на заточном станке в жестком режиме для всех кругов одинаково негативно влияет на производительность обработки ввиду разрушения алмазных зерен и «затягивания» связки. Время шлифования при нечетных проходах для всех кругов имеет тенденцию к снижению после 3-4 проходов. Происходит интенсивное обнажение новых алмазных зерен, разрушение уже работающих. Наличие большого числа активных режущих кромок способствует более легкому и быстрому удалению материала.

При выполнении четных проходов, когда объем удаляемого материала и площадь контакта круга и обрабатываемого образца возрастают, время шлифования увеличивается в 2 – 3 раза после 60-100 проходов. К этому времени значительно округляется кромка круга и боковые рабочие поверхности имеют вид эвольвенты. Для стандартного круга наблюдается более значительный рост времени шлифования. Данные различия в работе кругов можно объяснить большей самозатачиваемостью опытных кругов вследствие растворения модифицирующего наполнителя водой при обработке. Наличие модификаторов изменяет соотношение силы резания и трения, оказывает влияние на интенсивность изнашивания указанных алмазных кругов. Такие круги лучше сохраняют профиль рабочих поверхностей на всем периоде работы.

Волнообразный характер зависимости производительности от времени шлифования указывает на наличие эффектов засаливания и самозатачивания и значительного их изменения для кругов различного состава. Особенно отчетливо это прослеживается для круга с содержанием модифицирующих гранул $B_4C - B_2O_3$ более 20 об. %. Оптимальная концентрация модификатора составляет 10-12 об. %.

Во всех случаях изнашивание испытываемых кругов происходило наиболее интенсивно по вершине круга, где алмазоудержание невысокое ввиду максимальной нагрузки и наличия минимального объема связки, удерживающей зерно. Вдоль кромки круга располагаются дорожки трения, имеющие как кольцевой вид, так и вид отдельных участков спиралей с малым закруглением и запытых. Короткие спиральные канавки вызываются прокатыванием мало разрушенных алмазных зерен со шламом в зоне резания.

На рисунке 5 представлены картины изношенных рабочих поверхностей алмазных кругов на уровне 50-60% периода стойкости и состоянии обработанной поверхности хрустала.

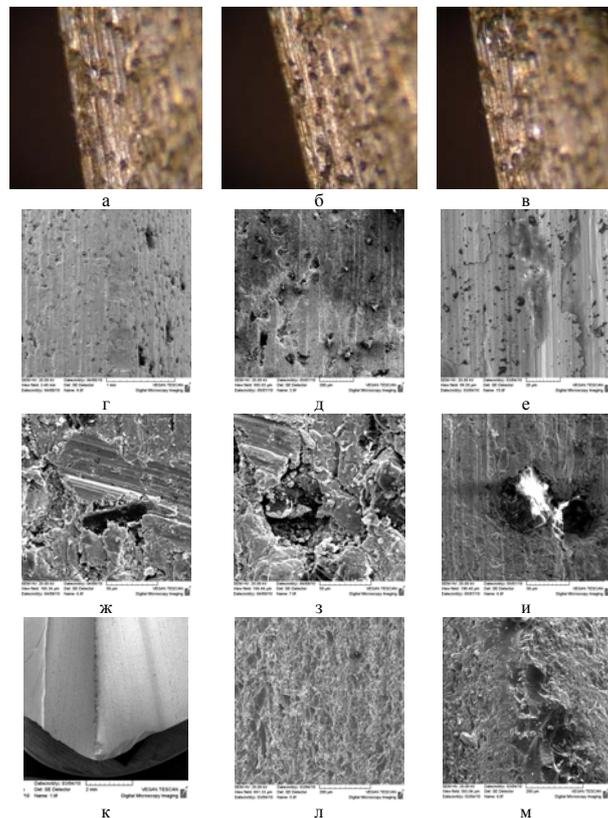


Рисунок 5 – Характер и морфология рабочих поверхностей алмазных кругов после обработки хрустала - круг № 1 (а, г, ж), круг № 2 (б, д, з), круг № 5 (в, е, и); вид обработанной поверхности хрустала (к, л, м)

Р. В. Левченко, В. В. Драгобецкий, д-р техн. наук,
 Р. Г. Пузырь, канд. техн. наук, Кременчуг, Украина

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ТЕОРИИ ОБОЛОЧЕК ПРИ ПРОФИЛИРОВАНИИ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ОБОДЬЕВ КОЛЕС

Показано, що методи виробництва якісних ободів коліс різних транспортних засобів засновані на процесах холодного штампування і радіально-ротацийному профілюванню. Для отримання реальної картини розподілу напружень і деформацій за профілем одержуваного виробу потрібно розглядати заготовку як оболонку обернення і залучити добре розроблений математичний апарат теорії оболонок і пластин. Це дасть можливість врахувати більшу кількість факторів, що впливають на якість одержуваного виробу. Шляхом теоретичного аналізу встановлювати вплив внутрішніх моментів, що діють в меридіональному і тангенціальному напрямках, на напружено-деформований стан оболонок в процесі формозміни.

Показано, что методы производства качественных ободьев колес различных транспортных средств основаны на процессах холодной штамповки и радиально-ротационном профилировании. Для получения реальной картины распределения напряжений и деформаций по профилю получаемого изделия требуется рассматривать заготовку как оболочку вращения и привлечь хорошо разработанный математический аппарат теории оболочек и пластин. Это даст возможность учитывать большее количество факторов, влияющих на качество получаемого изделия. Путем теоретического анализа устанавливать влияние внутренних моментов, действующих в меридиональном и тангенциальном направлениях, на напряженно-деформированное состояние оболочки в процессе формозмещения.

It is shown that the methods of production-quality wheel rims of different vehicles based on the processes of cold pressing and rotating radial profiling. To get the real picture of the distribution of stresses and deformations in the profile obtained product is required to consider procurement as a shell of revolution and bring well-developed mathematical apparatus of the theory of shells and plates. This will provide an opportunity to consider more factors that affect the quality of the product. Through theoretical analysis to establish the influence of internal moments acting in the meridional and tangential directions, the stress-strain of states in the process of forming a shell.

Теоретические основы для определения напряженно-деформированного состояния в процессе профилирования цилиндрических обечеек при получении ободьев колес транспортных средств были заложены в работах [1,2]. Они основывались на решении уравнений равновесия в цилиндрических координатах для выделенного участка заготовки с использованием условия пластичности Треска-Сен-Венана. Так как радиально-ротационное профилирование представляет собой процесс локального деформирования, где заготовка получает требуемую форму между парой вращающихся роликов, имеющих определенный профиль, то, как показано в работах [3,4], пластический очаг деформации окружен упруго деформированными зонами, которые оказывают значительное влияние на распределение пластических деформаций по профилю заготовки. Так же при деформировании цилиндрических обечеек имеет

Заключение. Проведенные исследования показали, что разработанный инструмент для обработки хрупких материалов (хрусталя, стекла и др.), обеспечивает стабильный режим шлифования с высокой режущей способностью. Использование в алмазосодержащих композиционных материалов гранул на основе карбида бора и карбида кремния, повышает размерную стойкость инструмента, не влияя на режимы правки и чистки режущих поверхностей. Повышение плотности матричного материала, приводит к значительному повышению стойкости алмазосодержащего инструмента. Разработанные алмазосодержащие композиционные материалы имеют большую твердость и прочность, чем применяемые традиционно, однако они достаточно легко поддаются ручной правке абразивными брусками. Применяемые в качестве наполнителей матрицы гранулы композиционных материалов, несмотря на меньшую твердость, чем алмазные зерна, полностью не разрушаются при правке алмазобразивного инструмента и являются дополнительными режущими элементами.

Список использованных источников: 1. Перерозин М.А. Справочник по алмазной обработке стекла. М.: Машиностроение, 1987. - 224с. 2. Патент 2006090527 ВОИС (WO) МПК 8В 24Д3/14. Шлифовальный круг на стекловидной связке и способ его изготовления. - № 05/024222; заявл. 27.12.2005; опубл. 31.08.2006. 3. Изобретение стран мира, вып. 19, № 8/2007. 3. Fielden J. H., Rubenstein C. The Grinding of Glass by a Fixed Abrasive// Glass Technology, Vol. 10, No. 3, 1969, p. 73. 4. Литов Ю. Н. Кинетика разрушения и упрочнения деформируемых твердых тел// Докл. АН УССР, 1979, 245, №4, с. 809 – 811. 5. Minář S. Základní poznatky učející směry řešení, intenzifikace presheho abrábní optického skla// Jemna mech. A opt. 1974, N10/12, S. 280 – 283. 6. Ваксер Д.В., Иванов В.А. и др. Алмазная обработка технической керамики / М.: Ленингр. отделение, Машиностроение, 1976. – 160 с. 7. Ардамацкий А.Л. Алмазная обработка оптических деталей / М.: Ленингр. отделение, Машиностроение, 1978. – 230 с. 8. Пащенко А.А., Емельянов Б.М., Рубан Ф.Г. Инструмент из сверхтвердых материалов на керамических связках / К.: Наукова думка, 1980. – 144 с.

Поступила в редакцию 15.06.2012

место действие моментов в тангенциальных и меридиональных направлениях, что не учитывалось в теоретических исследованиях проводившихся ранее.

Качественный результат по определению напряженно-деформированного состояния заготовки в процессе профилирования можно получить на основе достаточно хорошо разработанных моментной и безмоментной теорий деформирования оболочек вращения, где приводятся решения различного рода задач в упругой области [5]. Но для перехода в пластическую область данные теории выводят уравнения равновесия, которые не представляется возможным решить аналитическими методами и предлагаются только численные решения, что не дает в полной мере раскрыть сущность физических явлений, происходящих в очаге деформации при локальном формозмещении оболочек.

Целью данной работы является попытка упрощения аналитических расчетов при деформировании с переходом из упругой зоны в пластическую на примере определения изгибающих моментов при деформировании полосы.

Уравнение равновесия участка цилиндрической заготовки в упругопластической области при приведении внутренних моментов и усилий к перемещениям имеет вид [5]:

$$\text{где } D' = \left[\frac{ER^3}{12(1-\mu^2)} \right] - \text{цилиндрическая жесткость обечеек};$$

μ - коэффициент Пуассона (при пластической деформации $\mu = 0,5$, [4]);

$\varphi_c = \frac{E_c}{E}$, $\varphi_k = \frac{E_k}{E}$ - безразмерные величины;

E - модуль упругости для данного материала;

E_k - касательный модуль упругости;

$E_k = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ - по диаграмме растяжения;

u - радиальное перемещение участка заготовки;

h - толщина заготовки;

Как известно [3], в процессах вытяжки, отбортовки, раздачи, формовки и т.д. упругими деформациями, ввиду больших пластических, можно пренебречь. К таким процессам можно отнести и радиально-ротационное профилирование.

В случае чистого изгиба, когда сечение заготовки обладает двумя осями симметрии (оси X и Y – оси симметрии поперечного сечения), и изгиб будет происходить в одной этих плоскостей, удовлетворяя условиям совместности деформаций, будем иметь выражения деформаций для всего сечения:

$$\begin{aligned} e_{zz} &= e_r = \chi', \\ e_{xx} &= e_{yy} = \frac{1}{2} e_{zz}, \\ e_{xy} &= e_{xz} = e_{yz} = 0, \end{aligned} \tag{1}$$

где χ – кривизна центральной оси полосы в результате изгиба.

Принимаем, что материал бруса изотропный и не упрочняющийся. Нагружение полосы будем считать простым. Тогда направляющие тензоры напряжений и деформаций в упругопластической области совпадают и в проекциях на оси X, Y, Z будут выражаться формулами [6]:

$$\begin{aligned} \sigma_x - \sigma &= \frac{2\sigma_i}{3e_i}(e_x - e), \sigma_{xy} = \frac{\sigma_i}{3e_i} e_{xy}, \\ \sigma_y - \sigma &= \frac{2\sigma_i}{3e_i}(e_y - e), \sigma_{yz} = \frac{\sigma_i}{3e_i} e_{yz}, \\ \sigma_z - \sigma &= \frac{2\sigma_i}{3e_i}(e_z - e), \sigma_{zx} = \frac{\sigma_i}{3e_i} e_{zx}, \end{aligned} \tag{2}$$

где σ – среднее напряжение;

e – средняя деформация;

σ_i – интенсивность напряжений;

e_i – интенсивность деформаций.

Интенсивность напряжений для каждого материала является вполне определенной и независимой от характера напряженного состояния функцией интенсивности деформаций

$$\sigma_i = \Phi(e_i),$$

или, выделяя упругую часть

$$\sigma_i = 3Ge_i(1 - \omega(e_i)), \tag{3}$$

где G – модуль сдвига;

$\omega(e_i)$ - функция деформаций, зависящая от рода материала.

Относительно задачи изгиба полосы на основании (1) имеем $e_i = |e_r|$ и поэтому из (2) находим:

$$\sigma_z = \sigma_1; \sigma_x = \sigma_y = \sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{zx} = 0; \sigma_i = |\sigma_1|.$$

Из (3) получаем зависимость для σ_1 и e_1 :

$$\sigma_1 = Ee_1(1 - \omega(e_1)). \tag{4}$$

Вследствие симметрии сечения продольная сила $\int_{-h/2}^{h/2} \sigma_1 e dy = 0$ в полосе

отсутствует. Значит, задача решается одним только соотношением между изгибающим моментом и кривизной, которое получается, если написать вы-

ражение момента внутренних напряжений и приравнять его изгибающему моменту [6]:

$$M = 2 \int_0^{h/2} \sigma_I b y dy, \quad (5)$$

где b – ширина сечения;
 h – высота сечения.

Это уравнение на основании (3) с учетом упругопластических деформаций запишется в виде:

$$M = EI \chi - \int_0^{h/2} \omega e_I b y dy, \quad (6)$$

где I – момент инерции сечения.

Упругие деформации необходимо учитывать при получении деталей операциями гибки, в других процессах обработки металлов давлением эти деформации очень малы по сравнению с пластическими деформациями и поэтому при расчетах формоизменения в пластической области ими пренебрегают. В связи с этим упрощим выражение для изгибающего момента, взяв только пластические деформации, из (3) получим:

$$\sigma_I = E e_I \omega(e_I), \quad (7)$$

тогда

$$M = \int_0^{h/2} E e_I \omega(e_I) b y dy. \quad (8)$$

В точке перехода от упругих напряжений к пластическим, они равны между собой и равны напряжению текучести (материал не упрочняющийся)

$\sigma_{упр} = \sigma_s = \sigma_I$. Отсюда $e_I = \frac{\sigma_s}{E}$. Подставляя полученное выражение в (8) и,

учитывая, что $\omega = I$ для идеально пластичного материала получим:

$$M = \int_0^{h/2} \sigma_s b y dy = \sigma_s b \frac{y^2}{2} \Big|_0^{h/2} = \sigma_s b \frac{h^2}{8},$$

$$M = \int_{-h/2}^0 \sigma_s b y dy = \sigma_s b \frac{y^2}{2} \Big|_{-h/2}^0 = -\sigma_s b \frac{h^2}{8},$$

$$M_{\Sigma} = \left| \sigma_s b \frac{h^2}{8} \right| + \left| -\sigma_s b \frac{h^2}{8} \right| = \sigma_s b \frac{h^2}{4}. \quad (9)$$

где σ_s – предел текучести материала.

Получили выражение для пластического изгибающего момента. Похожее выражение было получено в работах многих исследователей, так напри-

мер, в работе [3] при условии, что изгиб осуществляется по сравнительно большому радиусу, когда нейтральная поверхность совпадает с серединой поверхностью заготовки ($\rho_n = r + \frac{s}{2} = R - \frac{s}{2}$), деформирование происходит без упрочнения, толщина упругодеформированного слоя мала, то выражение для изгибающего момента для единичной ширины заготовки имело вид:

$$M = \int \sigma_s \rho d\rho + \int \sigma_s \rho d\rho = \sigma_s \frac{R^2 - \rho_n^2 - \rho_n^2 + r^2}{2} =$$

$$= \sigma_s \frac{(R - \rho_n)(R + \rho_n) - (\rho_n - r)(\rho_n + r)}{2} = \sigma_s \frac{R + \rho_n - \rho_n - r}{4} = \sigma_s \frac{s^2}{4},$$

где R – радиус кривизны наружной поверхности;

r – радиус кривизны внутренней поверхности;

ρ_n – радиус кривизны нейтрального слоя.

Вывод. На примере теоретического анализа процесса упругопластического изгиба удалось упростить выражение для определения изгибающего момента в пластической области. Разработанный подход можно применить к теоретическому анализу процесса профилирования, который схематически представляет собой локальное деформирование оболочек вращения. Опираясь на хорошо разработанный математический аппарат теории оболочек и пластин и, применяя его к анализу напряженно-деформированного состояния при профилировании ободьев колес, можно добиться учета большего количества факторов, влияющих на распределение деформаций по толщине оболочки, тем самым значительно повысить точность исследования и наметить пути усовершенствования процесса.

Список использованных источников: 1. Потехукин Н.В. Исследование процесса радиального профилирования // Н.В. Потехукин // Автомобильная промышленность. – 1976. – №4. – С. 31-35. 2. Потехукин Н.В. Экспериментальное исследование процесса формообразования профилированных ободьев // Н.В. Потехукин // Автомобильная промышленность. – 1977. – №1. – С. 33-36. 3. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки / Попов Е.А. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с. 4. Тимошенко С.П. Пластинки и оболочки [Текст] / С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – М.: Наука, 1966. – 635 с. 5. Матвийчук В.А. Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе анализа деформируемости металлов: монография / В.А. Матвийчук, И.С. Алиев. – Краматорск: ДГ МА, 2009. – 268 с. 6. Ильишин А.А. Пластичность. Упругопластические деформации. Ч 1 / А.А. Ильишин. – М.: ОГИЗ, 1948. – 377 с.

Поступила в редакцию 11.05.2012

УДК 621.757

В.М. Липка, Мелитополь, Украина
Ю.Л. Рапацкий, канд. техн. наук, Севастополь, Украина

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ СБОРКЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ СИЛОВЫХ АГРЕГАТОВ

Розглянути технологичні проблеми підвищення надійності різьбових з'єднань у автомобільних силових агрегатах. Аналізуються результати виробничого експерименту на Мелітопольському моторному заводі. Наведено рекомендації з підвищення надійності різьбових з'єднань технологічними методами.

Рассматриваются технологические проблемы повышения надежности резьбовых соединений в автомобильных силовых агрегатах. Анализируются результаты производственного эксперимента на Мелитопольском моторном заводе. Приводятся рекомендации по повышению надежности резьбовых соединений технологическими методами.

Technological problems of increasing of reliability of screw—thread junctions in motor-car power aggregate are considering. The results of production experiment on the Melitopol engine plant are analyzing. Recommendations of increasing of reliability of screw—thread junctions by technological methods are represented.

Постановка проблемы. Конкуреноспособность сложных изделий машиностроения, таких, как силовые агрегаты (СА) для легковых автомобилей, существенно зависит от их надежности, которая, в свою очередь, в значительной мере определяется технологией изготовления деталей и качеством сборки готовой продукции. По разным оценкам, до 15-20% отказов СА в процессе эксплуатации прямо либо косвенно обусловлены низкой надежностью резьбовых соединений (РС), обеспечить стабильное высокое качество сборки которых в условиях крупносерийного производства крайне сложно. Примером такого производства является изготовление СА для автомобилей «Сенс» и «Ланос», на хозрасчетном предприятии (ХРП) «АвтоЗА3-Мотор» (г. Мелитополь), где выпускается более 75000 шт. в год СА различных модификаций. Собранный СА включает в себя инжекторный двигатель рабочим объемом 1,3 либо 1,4 литра в сборе с механизмом сцепления, коробку передач, а также систему впрыска топлива, стартер, генератор, насос системы охлаждения и ряд других узлов. Подавляющее большинство разъемных соединений в СА являются резьбовыми, более 80% из которых непосредственно влияют на работоспособность готового изделия при эксплуатации его на автомобиле.

Восстановление работоспособности СА после отказа, вызванного неисправностью РС, в большинстве случаев требует существенных материальных затрат, а в гарантийный период ведет к прямым убыткам для производителя.

Вопросам автоматизированной сборки РС посвящены многие отечественные и зарубежные публикации, но в них недостаточно внимания уделено анализу факторов, вызывающих отказы изделий с РС при эксплуатации. Про-

блема повышения надежности РС на этапе их изготовления, т.е. технологическими методами, остается актуальной.

Целью статьи является исследование влияния совместного влияния различных факторов на причины возникновения отказов РС, а также анализ способов повышения надежности изделий машиностроения с такими соединениями.

Анализ результатов исследований. В соответствии с технической документацией на СА, для большинства РС конструктивно заданы посадки 6H/6h либо 5H/6h, точное соблюдение которых в целом позволяет обеспечить необходимый уровень качества сборки. Вместе с тем, в реальных производственных условиях ХРП «АвтоЗА3-Мотор», при невозможности сплошного контроля геометрических и точностных параметров всей номенклатуры болтов и шпилек, программа выпуска которых составляет по каждому наименованию от 75 до 750 тысяч в год, а также параметров гаек и резьбовых отверстий в корпусных деталях, соблюдение указанных посадок не всегда возможно обеспечить и возникает вероятность отказа изделий в процессе эксплуатации. [2,3,4]

При свинчивании и затяжке РС в технологическом процессе автоматизированной сборки применяются различные методы и способы приложения крутящего момента к ключу. При этом необходимо отметить, что чем выше требования к точности затяжки, тем ниже производительность технологического процесса, что повышает издержки предприятия и снижает экономическую эффективность его деятельности. Кроме того, каждый способ затяжки, осуществляемый с помощью специализированного оборудования, требует индивидуального подхода к выбору метода контроля качества сборки РС. Поскольку наиболее важным параметром является величина натяжения болта, контролировать которую в ходе автоматизированной сборки практически невозможно, то точность процесса затяжки зависит от корректности установления функциональной связи между фактическим усилием натяжения болта и контролируемым параметром, в роли которого может выступать крутящий момент, угол поворота головки болта либо гайки, удлинение стержня болта, деформация прокладки и т.д. Наименее точным, вместе с тем самым высокопроизводительным и наиболее распространенным является метод приложения контролируемого значения крутящего момента. При этом крутящий момент $M_{КЛ}$, прикладываемый к ключу, уравнивается суммой двух моментов [2,3]:

$$M_{КЛ} = M_P + M_T, \quad (1)$$

где $M_{КЛ}$ - крутящий момент на ключе; M_P - момент в резьбе; M_T - момент сил трения по торцу головки болта либо гайки. При автоматизированной сборке завинчивание и затяжка резьбовых соединений производится, как правило, с помощью приспособлений, заранее отрегулированных на оп-

ределенную величину крутящего момента, по достижении которого дальнейшая затяжка прекращается. По данным [2,3], разброс значений момента $M_{КЛ}$ из-за погрешности приспособлений может достигать 35%, при этом их конструкция не позволяет определить наличие случайным образом возникшего натяга в процессе свинчивания, за счет которого возникает неконтролируемый момент сопротивления вращению гайковерта при затяжке. В случае, если $M_{КЛ} \approx M_p$, что имеет место при наличии натяга в резьбовом соединении, то затяжка автоматически прекращается и соединение считается затянутым, но требуемое натяжение болта либо шпильки при этом не достигается. Как показали эксперименты, проведенные на ХРП «АвтоЗА3-Мотор», соотношение значений M_p и M_T в выражении (1), является случайной величиной и меняется в широких пределах, что может приводить, например, к разбросу величины фактического натяжения стержней шатунных болтов двигателя модели 307 до 25-35% в одном изделии, где их используется 8 шт. Существенным недостатком рассматриваемого метода является также наличие в растянутом стержне болта напряжений кручения, совместное действие которых с напряжениями растяжения может приводить к деформации стержня и его обрыву. При значительных знакопеременных нагрузках, сопровождающихся вибрациями и резкими перепадами температур, как это имеет место в СА, наличие напряжений кручения в стержне болта может приводить к релаксации (ослаблению) затяжки соединения и к его отказу.

Как установлено в [3], значение момента в резьбе M_p , даже при отсутствии в ней натяга, существенно зависит от значений коэффициентов трения. Максимальное усилие натяжения болта достигается при наибольшем значении прикладываемого момента и наименьших значениях коэффициентов трения. Усилие натяжения болта будет иметь минимальное значение при минимальном моменте и наибольших значениях коэффициентов трения. На величину коэффициента трения в каждом резьбовом соединении будет влиять совокупность многих факторов, среди которых наиболее существенными являются величины полей допусков резьб, отклонения формы и профиля резьбовых изделий, шероховатость поверхностей резьб, наличие и толщина покрытий на резьбовых изделиях, наличие на них смазки, различных посторонних частиц, металлической пыли, стружки и т.д. Из результатов экспериментальных исследований, проведенных на ХРП «АвтоЗА3-Мотор» и изложенных в [3], следует, что изменение значения коэффициентов трения от 0,10 до 0,14 при колебаниях прикладываемого момента в пределах 44–56 Н·м приводит к изменениям усилия натяжения болта на 30–45%. Если максимальное значение усилия натяжения болта, вызывает напряжение затяжки, не превосходящее $0,9 \sigma_T$ (σ_T – предел текучести материала болта), то в собранном узле могут наблюдаться незатянутые соединения. Если же максимальное усилие натяже-

ния болта вызывает напряжения, превосходящие σ_T , то уже в процессе сборки могут происходить разрушения затягиваемых соединений. Разрушение болта, например, в резьбовом отверстии в блоке цилиндров, приводит к необходимости замены блока либо выполнения достаточно сложного ремонта, что приводит к росту внутрипроизводственных издержек предприятия. Следует отметить, что, по результатам проведенных авторами исследований параметров трения в резьбовых соединениях наблюдается большой разброс величин коэффициентов трения в резьбе μ' и по торцу болта (гайки) μ_0 . Величина μ' имеет более значительный разброс, что свидетельствует о существенно более низком качестве изготовления резьбовой поверхности, по сравнению с торцом болта или гайки, либо шайбы, если она используется в рассматриваемом РС. В автомобильной промышленности практически не используются шлифованные резьбы, для снижения себестоимости резьбовых деталей их изготавливают высокопроизводительным методом накатывания. Кроме того, при затяжке РС, по данным [2,3], примерно 90% работы тратится на преодоление сил трения и упругое закругление элементов соединения и только около 10% непосредственно связано с созданием в болте необходимого усилия натяжения. Из изложенного следует, что при контроле затяжки РС по величине прикладываемого крутящего момента с большой вероятностью возможно появление недотянутых или перетянутых болтов и гаек, что, в конечном итоге, приводит к преждевременному выходу из строя собираемых изделий.

Как показали экспериментальные исследования, проведенные на ХРП «АвтоЗА3-Мотор», именно качество резьбовых деталей и особенности применяемой технологии автоматизированной сборки в наибольшей мере, среди прочих факторов, определяют надежность РС при их последующей эксплуатации. Проанализируем подробнее процесс изготовления деталей с наружной резьбой, входящих в состав РС в СА, в рассматриваемом случае – болтов и шпилек М5...М12. В условиях крупносерийного производства экономически наиболее целесообразно применение метода резьбонакатывания на двухроликовых станках. Несмотря на простоту выполнения технологических операций, накатывание резьбы является сложным, многопараметрическим, стохастическим процессом. Из-за сложности анализа и моделирования процесса накатывания резьбы во многих случаях считается, что рекомендации по выбору силы и длительности накатывания, содержащиеся в различных нормативных документах, носят условный характер и в производственных условиях значения технологических параметров часто подбирают опытным путем. Вместе с тем в последние годы были получены математические модели, в частности, [5], позволяющие с достаточной точностью рассчитывать режимы резьбонакатывания, однако результаты их применения не позволяют оценить вероятность изготовления качественных метизов. Вероятность изготовления качест-

венных деталей с наружной резьбой в целом характеризуется надежностью процесса резьбонакатывания, но такой анализ в литературе не приводится.

Резьбонакатывание позволяет в большинстве случаев обеспечить выпуск качественной продукции, однако в условиях реального производства невозможно исключить различные отказы в ходе технологического процесса, которые могут быть как независимыми, так и взаимосвязанными между собой. На рисунке 1 представлен анализ результатов производственного эксперимента, проведенного на ХРП «АвтоЗА3-Мотор», в виде графов состояний процесса накатывания наружной резьбы на деталях автомобильных СА, при возникновении различных отказов.

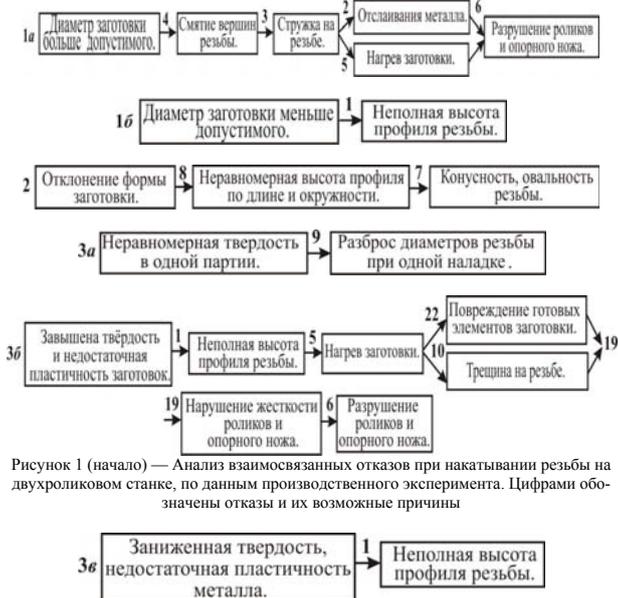


Рисунок 1 (начало) — Анализ взаимосвязанных отказов при накатывании резьбы на двухроликовом станке, по данным производственного эксперимента. Цифрами обозначены отказы и их возможные причины



Рисунок 1 (продолжение)



Рисунок 1 (окончание).

Как видно из рисунка 1, по результатам производственного эксперимента классифицированы 17 основных факторов, способных вызвать значительно большее количество различных отказов, в том числе и взаимосвязанных. Рассматриваемая технологическая система может быть описана с помощью математической модели, построенной по методике [1]. Отметим необходимые допущения и ограничения. Будем считать потоки отказов всех элементов пу-

ассоновскими, а время их восстановления подчиняющимся экспоненциальному закону. Потоки взаимосвязанных отказов также можно считать пуассоновскими, поскольку вероятностью одновременного выхода из строя двух и более элементов можно пренебречь.

На характеристики потока восстановлений оказывает влияние дисциплина ремонта, поэтому будем считать, что восстановление начинается мгновенно после выявления отказа.

В результате решения методом Гаусса системы уравнений, составленной по методике [1], можно получить вероятности пребывания системы в рабочем и отказовых состояниях, что позволяет оценить надежность процесса резьбонакатывания и определить степень влияния каждой из выявленных причин отказов на способность рассматриваемой технологической системы в произвольный момент времени выпускать качественную продукцию.

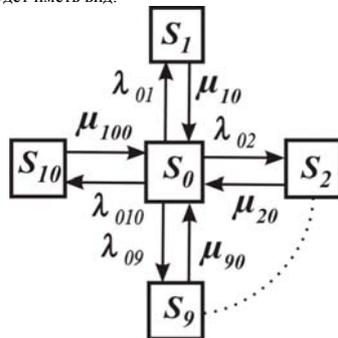
В таблице 1 приведена часть количественных экспериментальных данных по основным видам отказов, возникающих в процессе накатывания. Результаты получены на двухроликковых станках типа GWR-80

Таблица 1 – Результаты производственного эксперимента

	Резьба М10×1,25 N=15000 шт. Полуавтоматический режим накатывания	Резьба М8×1,25 N=20000 шт. Автоматический режим накатывания
Стружка на резьбе	8...10	20...100
Косая резьба	2...40	0...10
Короткая резьба	2...40	1...200
Смятие вершин резьбы	2...10	3...200
Неполная высота профиля	2...20	5...40
Отслаивание металла	0...5	0...8
Конусность и овальность резьбы	0...20	0...5
Колесания среднего и наружного диаметра	0...20	0...50
Выкрашивание резьбовых ниток в месте совпадения с фаской	0...10	0...10
Забойны на резьбе	5...20	0...8

Экспериментально установлено также, что отказы, возникающие в процессе накатывания, могут быть как независимыми друг от друга, так и взаимосвязанными. Рассмотрим упрощенную математическую модель надежности процесса накатывания, пренебрегая вероятностью возникновения взаимосвязанных отказов. Будем рассматривать резьбонакатной станок как дискрет-

ную систему, для которой состояние S_0 – станок исправлен, параметры резьбовых деталей соответствуют всем требованиям; S_1 – диаметр заготовки больше или меньше допустимого; S_2 – отклонения формы заготовки; S_3 – неравномерная твердость и пластичность заготовок в одной партии; S_4 – отклонения фаска заготовки; S_5 – износ роликов; S_6 – отклонения от параллельности опорной поверхности ножа и осями шпинделя; S_7 – неправильная установка заготовки; S_8 – завышенное расстояние между осями шпинделей; S_9 – отклонение от параллельности и биение шпинделей станка; S_{10} – недостаточная жесткость резьбонакатного станка. Из всех возможных случайных и параметрических отказов, возможных в процессе резьбонакатывания, выбраны только те, возникновение которых невозможно полностью предвидеть и предотвратить при технологической подготовке производства и техническом обслуживании оборудования. Граф состояний рассматриваемой системы в данном случае будет иметь вид:



Предполагая потоки отказов и восстановлений простейшими, а время безотказной работы t_0 и время восстановления работоспособности после отказа t_r распределенными по экспоненциальному закону, запишем для рассматриваемого случая систему уравнений Колмогорова, с помощью которых, используя условие нормировки, определим финальные вероятности $P_0...P_{10}$ пребывания исследуемого в состояниях $S_0...S_{10}$.

$$\begin{cases}
 P_0 = \left(1 - \lambda_{01}/\mu_{10} + \lambda_{02}/\mu_{20} + \dots + \lambda_{010}/\mu_{100}\right)^{-1} \\
 P_1 = P_0 \lambda_{01}/\mu_{10} \\
 P_2 = P_0 \lambda_{02}/\mu_{20} \\
 \dots \\
 P_{10} = P_0 \lambda_{010}/\mu_{100}
 \end{cases} \quad (1)$$

Решение полученной системы уравнений позволит количественно оценить влияние каждого из основных факторов, имеющих место при резьбонакатывании, на надежность рассматриваемого процесса и предложить меры по увеличению выпуска качественной готовой продукции за счет снижения количества отказов различных видов.

При анализе надежности РС и процесса изготовления деталей с резьбой необходимо отметить, что для общепринятые законы распределения, обычно применяемые для описания надежности технических систем, не вполне адекватно описывают надежность оборудования, элементы которого подвержены совместному действию внезапных и износных отказов. Совместное действие внезапных и постепенных (износных) отказов приводит к значительному возрастанию их общей интенсивности и существенно большему снижению надежности автоматизированного технологического оборудования по сравнению с их влиянием по отдельности. Вероятность безотказной работы при совместном действии внезапных и износных отказов может быть более точно определена по формуле [1]:

$$P(t) = e^{-\lambda P_u(t)}. \quad (2)$$

Для начального момента времени $t = 0$, соответствующего началу эксплуатации нового элемента, входящего в состав технологического оборудования, $P_u(t=0) = 1$. В дальнейшем $P_u(t)$ изменяется по следующему закону [1]:

$$P_u = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma^2}} dt; \quad (3)$$

где t – наработка элемента; T – среднее значение его долговечности.

В случае если элемент не новый и имеет уже наработку t_0 , то

$$P(t) = e^{-\lambda t} \frac{P_u(t_0 + t)}{P_u(t_0)}. \quad (4)$$

Графики надежности элементов для такого случая показаны на рисунке 2.

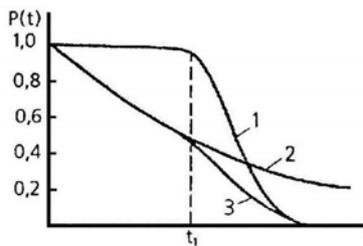


Рисунок 2 – Графики изменения надежности P(t)

1 – изменение надежности при действии только износовых отказов; 2 – изменение надежности при действии только внезапных отказов $P(t) = e^{-\lambda t}$; 3 – изменение надежности при совместном действии внезапных и износовых отказов $P(t) = e^{-\lambda t} P_0(t)$.

Как видно из графиков, надежность оборудования, с учетом совместного действия внезапных и износовых отказов, не подчиняется экспоненциальному закону и на интервале $t > t_1$ значительно ниже величины, соответствующей влиянию только внезапных отказов.

Выводы и рекомендации. Как следует из анализа результатов проведенных исследований, проблема обеспечения качества и надежности РС остается актуальной. Существующее технологическое оборудование для сборки РС не позволяет гарантировать создание расчетной величины осевых усилий в стержне болта либо шпильки при достижении заданного момента затяжки, что является одной из главных причин отказов готовых изделий при эксплуатации. Для повышения качества автоматизированной сборки РС в условиях крупносерийного производства целесообразно использовать рекомендации, приведенные в [2,3,4]. Надежность РС существенно зависит от качества изготовления резьбовых деталей, в частности, с наружной резьбой, которое, в рассматриваемом случае, в целом характеризуется надежностью процесса накатывания резьбы. Для повышения надежности процесса резьбонакатывания следует принимать меры по исключению причин отказов, показанных на рисунке 1. Как видно из рисунка 1, значительная часть отказов при резьбонакатывании вызваны неправильной установкой заготовки в станок, что может приводить не только к выпуску брака, но и к отказу оборудования. Особое внимание следует уделять точности размеров и формы заготовок под резьбонакатывание, поскольку недопустимые отклонения указанных параметров

приводят не только к браку, но и к отказам инструментов. Повышение стойкости резьбонакатных роликов также позволяет повысить надежность резьбонакатывания. Значительную роль в повышении надежности резьбонакатывания играет пластичность и другие механические свойства заготовок, которые необходимо проверять при поступлении новой партии металла. Целесообразно использовать результаты, полученные в [5], для более точного расчета технологических параметров процесса резьбонакатывания. Для более точной оценки параметров надежности технологического оборудования, применяемого при изготовлении резьбовых деталей и автоматизированной сборке РС, элементы которого подвержены совместному действию внезапных и степенных отказов, следует использовать выражения (2...4). Решение системы уравнений (1) для рассматриваемой технологической системы, позволяет выделить доминирующие факторы в снижении надежности процесса резьбонакатывания. В целом проведенные исследования позволяют с позиций системного подхода оценить надежность технологического процесса резьбонакатывания как составную часть решения задачи обеспечения надежности и высокого качества сборки РС в СА.

Направление дальнейших исследований связано с разработкой более совершенных технологических методов и технических средств обеспечения сборки надежных РС в условиях крупносерийного производства, что позволит повысить надежность и конкурентоспособность СА, выпускаемых ХРП «АвтоЗАЗ-мотор». Результаты исследований могут применяться также на других машиностроительных предприятиях.

Список использованных источников: 1. Паиков Е.В. Транспортно-накопительные и загрузочные системы в сборочном производстве: учеб. пособие / Е.В. Паиков, В.Я. Копп и др. – К.: УМК ВО, 1992. – 536 с. 2. Липка В.М. Повышение качества автоматизированной сборки силовых агрегатов автомобилей на основе анализа усилий, возникающих в резьбовых соединениях // В.М. Липка, Ю.Л. Рапацкий // Автоматизация: проблемы, идеи, решения: Материалы междунар. научн.-техн. конф., г. Севастополь, 6–10 сентября 2010. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2010. – С.238-242. 3. Ислюевич Г.Б. Затяжка и стопорение резьбовых соединений: Справочник / Г.Б. Ислюевич, Ю.В. Шарловский — 2-е изд. — М.: Машиностроение, 1985. — 224 с. 4. Липка В.М. Оценка влияния параметров резьбовых крепежных изделий на качество сборки силовых агрегатов автомобилей / В.М. Липка, Ю.Л. Рапацкий // Вестник СевНТУ. Вып. 107: Машиностроение и транспорт: сб. науч. тр.; Севастоп. нац. тех. ун-т. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2010. — С.121—127. 5. Липка В.М. Математическая модель накатывания наружных резьб роликами // В.М. Липка, Ю.Л. Рапацкий // Вестник СевНТУ. Вып. 111: Машино-приборостроение и транспорт: сб. науч. тр.; Севастоп. нац. тех. ун-т. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2011. — С.138—143.

Поступила в редакцию 15.06.2012

В.А. Логоминов, А.И. Гермашев, В.А. Кришталь
Ю.Н. Внуков, д-р техн. наук, Запорожье, Украина

О ХАРАКТЕРИСТИКЕ ЖЕСТКОСТИ ДЛЯ ТОНКОСТЕННОЙ ДЕТАЛИ ТИПА «ЗАЩЕМЛЕННОЙ ПЛАСТИНЫ»

Розглянуті питання термінології щодо характеристики жорсткості тонкостінних деталей типу «затиснених пластин». Розглянуті фактори, що впливають на їх жорсткість. Показано відмінність понять «нежестка» та «маложестка» деталь. Запропоновано використовувати поняття «тонкостінна» для деталей типу «затиснених пластин». Показаний зв'язок між характеристиками, що впливають на жорсткість деталі, та її частотою власних коливань. В якості прикладу тонкостінних деталей типу «затиснених пластин» розглянуті лопатки осевих моноколес авіаційних газотурбінних двигунів.

Рассмотрены вопросы терминологии для характеристики жесткости тонкостенных деталей типа «затисненных пластин». Рассмотрены факторы, влияющие на их жесткость. Показано отличие понятий «нежесткая» и «маложесткая» деталь. Предложено использовать понятие «тонкостенная» для деталей типа «затисненных пластин». Показана связь между характеристиками, влияющими на жесткость детали, и частотой ее собственных колебаний. В качестве примера тонкостенных деталей типа «затисненных» рассмотрены лопатки осевых моноколес авиационных газотурбинных двигателей.

The problems of terminology to describe the stiffness of thin-walled workpieces called "clamped plate". The factors influencing their stiffness are considered. Difference of terms of "nonrigid" and "flexible" workpiece is disclosed. The term "thin-walled" is proposed to use for the workpieces called "clamped plates". The relationship between the characteristics influencing the stiffness of the workpiece and the frequency of their natural oscillations is disclosed. As an example thin-walled parts of the "clamped plate" axial blisk of gas-turbine aero-engine is considered.

Анализ большого числа диссертационных работ, монографий и статей выявил неоднозначность трактовки понятия жесткости для тонкостенных обрабатываемых деталей. Например, Куклев [1] пишет: «по геометрической форме, размерам, значению модуля упругости материалов и схеме нагружения различают категории массивных и нежестких деталей». Массивными он называет конструкции деталей, габаритные размеры которых равны или мало отличаются друг от друга, идеальными являются детали симметричной формы – куб или шар. К нежестким конструкциям он относит детали с различными размерами поперечных сечений $A \times B$, длин l , толщин стенок t и высот H . Нежесткость конструкции деталей описывает количественным соотношением размеров. Так, например, нежесткие круглые пластины имеют $H \leq (0,2-0,3)D$, гладкие и ступенчатые валы – $l \geq 15D$, трубчатые детали – $t \leq 0,05D$ [2]. Предпринимались попытки классифицировать детали по четырем категориям жесткости: очень жесткие (массивные), повышенной, средней и малой жесткости [3].

За более полный критерий нежесткости также предлагалось принять несущую способность конструкции детали [1], которая является функцией их размеров, геометрических характеристик поперечного сечения и расчетного сопротивления нагрузкам. Такая неопределенность понятия жесткость не массивных деталей привела к тому, что в одних работах тонкостенные детали называют нежесткими [1, 4, 5, 6], а в других – маложесткими (но все-таки жесткими) [7, 8, 9].

По нашему мнению методической основой для разработки классификации по жесткости тонкостенных деталей высокой точности может быть принята количественная взаимосвязь жесткости и массы, предложенная В.И. Журавлевым [10]. Действительно, в современном машиностроении весьма часто прибегают к тонкостенным конструкциям обеспечивающим высокую жесткость и прочность при сравнительно небольшом весе.

ГОСТом 30987-2003 «Основные нормы взаимозаменяемости. Назначение размеров и допусков для нежестких деталей» дается однозначное определение нежесткой детали [11]. В нем указано, что нежесткой называется деталь, которая деформируется до такой степени, что в свободном состоянии выходит за пределы допусков размеров и (или) формы и расположения, относящихся к детали в закрепленном состоянии. Причем под свободным понимается состояние детали на которую воздействует только сила тяжести.

Рассмотрим применение условия нежесткости для случая, когда обрабатываемая деталь является тонкостенной защемленной пластиной. На рис. 1 приведена схема нагружения защемленной балки с размерами: L – вылет, h – высота, B – ширина, нагруженной равномерно распределенными силами собственного веса, где величина прогиба определяется формулой (1) [12].

$$f = \frac{q \cdot L}{8 \cdot E J_x} \text{ при } z = 0. \quad (1)$$

В этой формуле учтены все характеристики детали, которые отвечают за её жесткость, – как способность сопротивляться образованию деформации в виде её прогиба.

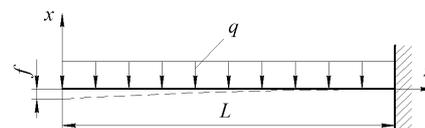


Рисунок 1 – Схема нагружения защемленной балки силами собственного веса

Рассмотрим влияние всех составляющих формулы (1) на величину прогиба, под действием собственного веса.

q – интенсивность нагрузки определяется величиной массы пластины, приходящейся на единицу ее длины [Н/м]. Другими словами $q = g \cdot \rho \cdot B \cdot h$, где g – ускорение свободного падения [м/с²], ρ – плотность материала [кг/м³]. Уменьшить q можно уменьшением плотности материала ρ или уменьшив площадь поперечного сечения $F = B \cdot h$. Однако уменьшение площади сечения значительно уменьшает величину момента инерции сечения $J_x = \frac{B \cdot h^3}{12}$, причем снижение толщины пластины h влияет очень значительно.

l – вылет пластины влияет на величину прогиба очень сильно. С увеличением вылета прогиб увеличивается, т.е. жесткость пластины резко снижается.

E – модуль упругости, является физической константой материала пластины [Па], поэтому, чем выше значение E , тем меньше будет прогиб пластины и выше ее жесткость.

J – момент инерции сечения детали относительно главной оси перпендикулярной к плоскости изгибающего момента [м⁴]. Момент инерции характеризует форму и расположение площади сечения детали относительно центральной оси, в которой статический момент равен нулю. Для тонкостенных деталей это чрезвычайно важная характеристика, т.к. для снижения прогиба необходимо увеличивать момент инерции, что может быть достигнуто, если площадь сечения расположить подальше от центральной оси, т.е. центра тяжести сечения.

На рис. 2 приведены две одинаковые по площади, но различных по форме поперечные сечения пластины. Расчеты показывают, что форма сечения может существенным образом изменить момент инерции тонкостенных пластин и как следствие их жесткость. Момент инерции плоских сечений, показанных на рис. 2а и б определяется по формулам [12]:

$$I_{xa} = \frac{B \cdot h^3}{12}, \quad (2)$$

$$I_{xb} = \frac{h \cdot R^3}{2} \left(2\alpha + \sin 2\alpha - \frac{4\sin^2 \alpha}{\alpha} \right), \quad (3)$$

где R – радиус кривизны [м].

Угол α можно определить из соотношения $\alpha = \frac{B}{2R}$ [рад].

На рис. 2в приведен график зависимости соотношения моментов инерции плоских сечений $\frac{I_{xb}}{I_{xa}}$ в зависимости от радиуса кривизны R при $B = 20$ мм и $h = 1$ мм.

213

Из рис. 2в видно, что уменьшение радиуса кривизны поперечного сечения пластины (одинакового размера по высоте и ширине) в несколько раз может увеличивать величину момента инерции и как следствие в несколько раз увеличивать жесткость (т.е. уменьшать величину ее прогиба).

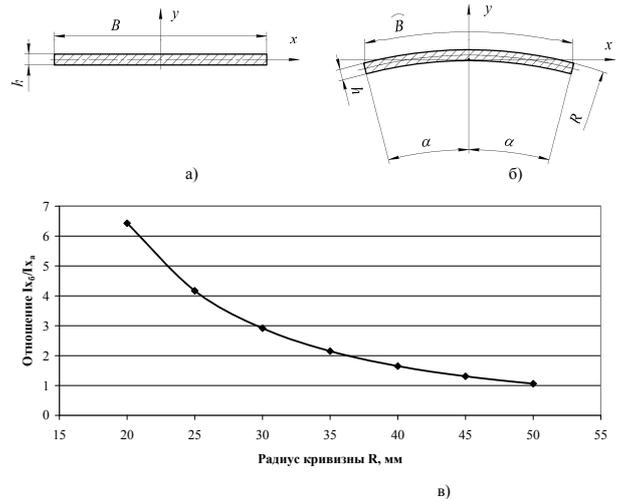


Рисунок 2 – Влияние формы поперечного сечения пластины, имеющих одинаковую площадь, на момент инерции ($I_{xa} < I_{xb}$)

Анализ формулы (1) позволяет одновременно с учетом веса, вылета, геометрических размеров и формы поперечного сечения, а также физических характеристик упругости материала детали установить уровень ее жесткости как свойства конструкции сопротивляться упругому деформированию.

Таким образом, тонкостенные детали типа «зашемленных пластин» могут быть как нежесткими, так и очень жесткими, в зависимости от сочетания всех параметров, входящих в формулу (1).

При механической обработке тонкостенных деталей часто возникают проблемы, связанные с появлением вибраций. Одной из основных характери-

214

стик упругой системы детали является частота ее собственных колебаний, которую необходимо определить для разработки рекомендаций по устранению вибраций.

Ниже приведена формула (4) для определения частоты собственных колебаний упругой системы детали типа «зашемленной пластины» [13].

$$\omega = \sqrt{\frac{A \cdot E \cdot I_x}{l^3 \cdot m}}, \quad [1/c] \quad (4)$$

где ω – круговая частота собственных колебаний.

A – коэффициент, учитывающий особенности конструкции упругой системы;

E – модуль упругости [Па];

l – вылет пластины [м];

m – масса пластины [кг];

Сравнение формул (1) и (2) показывает очевидную общеизвестную связь жесткости с величиной частоты собственных колебаний упругой системы детали, так как в эти формулы входят одни и те же составляющие.

Таким образом, все характеристики, уменьшающие деформацию детали под действием только сил тяжести и повышающие ее жесткость, приводят к увеличению частоты собственных колебаний ее упругой системы.

Другими словами если частота собственных колебаний упругой системы детали достаточно высокая, то можно утверждать, что деталь достаточно жесткая.

Примером тонкостенной и одновременно жесткой детали типа «зашемленной пластины» может служить лопатка моноколеса компрессора газотурбинного двигателя (ГТД).

На рис. 3а показан общий вид осевого моноколеса, а на рис. 3б дан эскиз лопатки моноколеса с размерами, которые указаны в таблице. На рис. 4а приведен общий вид центробежного моноколеса (ЦБК), а на рис. 4б – эскиз лопатки с размерами.

В таблице приведены частоты собственных колебаний лопаток осевых и центробежных моноколес, которые представляют собой детали типа «зашемленных пластин».

Высокий уровень собственных частот позволяет утверждать, что данные детали можно рассматривать как тонкостенные с высокой жесткостью.

Более того, анализ методики расчета на прочность рабочей лопатки компрессора [14] показывает, что допущения, принимаемые для расчетных схем, предполагают лопатку рассматривать как жесткую, консольно закрепленную балку, а ее деформацией под действием сил и моментов пренебрегают.

215

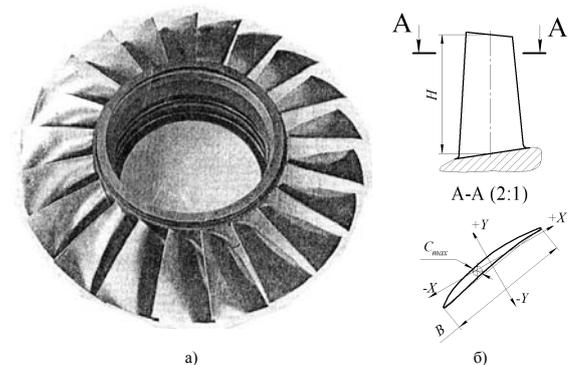


Рисунок 3 – Общий вид осевого моноколеса и эскиз лопатки

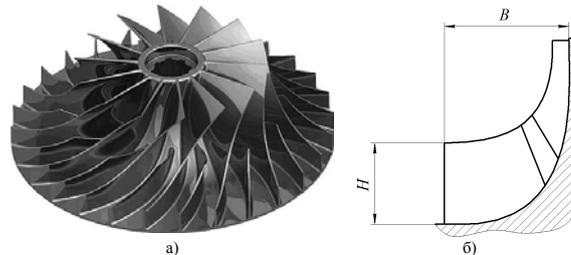


Рисунок 4 – Общий вид центробежного моноколеса и эскиз лопатки

Таблица – Частоты собственных колебаний лопаток моноколес

Ос ще бе	Модель ГТД	Размеры лопатки H×B×C _{max} , мм	Частоты соб- ственных коле- баний лопаток, Гц
	Д-27, 1-я ступень	128×(95...106)×(2,7...5,9)	345-380
	Д-27, 2-я ступень	нет данных	390-460

216

	АИ-222, 1-я ступень	162×(116...120)×(2,8...10,4)	293-310
	АИ-222, 2-я ступень	108×(74...80)×(2,1...3,9)	255-280
ЦБК	АИ-450МС [15]	38×58×(1,2...1,8)	2775-2905

Таким образом, при изучении особенностей механической обработки деталей типа «заземленной пластины» использование термина «нежесткой» или «маложесткой» детали должно быть обоснованным. В случае исследований технологических процессов механической обработки лопаток моноколес ГТД, точнее использовать термин «тонкостенная» деталь

Список литературы: 1. Куклев, Л.С. Оснастка для обработки нежестких деталей высокой точности [Текст] / Л.С. Куклев, М.М. Тазетдинов. – М.: Машиностроение, 1978. – 104 с.: ил. 2. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов [Текст] / Кован В. М., Корсаков В. С., Косилова А. Г., Калинин М. А.; ред. Корсакова В. С. – 3-е изд., доп. и перераб. – М.: Машиностроение, 1977. – 415 с. 3. Проблемы развития технологии машиностроения [Текст] / Под ред. Сателы Э.А. – М.: Машиностроение, 1968. – 592 с. 4. Егоров, Е.С. Повышение эффективности процессов обработки нежестких деталей инструментом из композитов с применением магнитной технологической оснастки [Текст]: Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Егоров Е. С. – Чита, 2004. – 161 с. 5. Яким, С.А. Устойчивость обработки нежестких заготовок на фрезерных станках [Электронный ресурс]: Дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / Яким С. А. – Ульяновск, 2005. – 136 с. Режим доступа: <http://diss.rsl.ru/diss/05/0777/050777010.pdf>. 6. Калафатова, Л.П., С.А. Поезд // Влияние конструктивных особенностей нежестких корпусных деталей на изменение их динамической жесткости при механической обработке / Калафатова, Л.П., С.А. Поезд // Науки праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. Випуск 92. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – 124 с. 7. Сергеев, А.В. Повышение стабильности и точности формы маложестких осесимметричных деталей путем автоматического управления положением инструмента [Электронный ресурс]: Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Сергеев А.В. – Тольятти, 2005. – 165 с. Режим доступа: <http://diss.rsl.ru/diss/05/0504/050504017.pdf>. 8. Долов, В.В. Программирование формообразующих траекторий на станках с ЧПУ при обработке маложестких деталей [Электронный ресурс]: Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Долов В.В. – Ростов-на-Дону, 2002. – 165 с. Режим доступа: <http://diss.rsl.ru/diss/02/0005/020005012.pdf>. 9. Лицов, А.Е. Разработка расчетного метода определения технологических условий концевой фрезерования маложестких сложно-профильных деталей с учетом их деформаций [Электронный ресурс]: Дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Лицов А.Е. – М.: РГБ, 2005. – 156 с. Режим доступа: <http://diss.rsl.ru/diss/05/0518/050518026.pdf>. 10. Журавлев, В. Н. Снижение веса машиностроительных конструкций. 2-е изд., перераб. и доп. / В. Н. Журавлев. – Свердловск, Машгиз, 1961. – 239 с. 11. ГОСТ 30987–2003. Основные нормы взаимозаменяемости. Назначение размеров и допусков для нежестких деталей [Текст]. – Введ. 2005–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 6 с. 12. Справочник по сопротивлению материалов [Текст] / Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В.; отв. ред. Писаренко Г. С. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наук. думка, 1988. – 736 с. 13. Феодосьев, В.И. Сопротивление материалов [Текст] / В.И. Феодосьев. – М.: Наука, 1973. – 544 с. 14. Шошин, Ю.С. Расчет на прочность рабочей лопатки компрессора или турбины. Учебное пособие / Ю.С. Шошин, С.В. Епифанов, С.Ю. Шарков. – Харьков: Харьковский авиационный институт, 2006. – 28 с. 15. Пухальська, Г.В. Забезпечення частот власних коливань у виробництві відцентрових коліс / Г.В. Пухальська, Г.В. Карась, В.В. Голощапова, Т.О. Панченко // Вестник двигателестроения. – 2012. – №1. – С. 121-127.

Поступила в редколлегию 15.06.2012

СТАНДАРТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ИННОВАЦИЯМИ И ЭКОИННОВАЦИЯМИ

У статті представлено загальні питання управління інноваціями і застосовані способи такого управління. Запропоновано чисельну розмежування між інновацією і екоінновацією. Приведено пропозиції по стандартному управлінню інноваційною діяльністю і пропозиція чисельного розрахунку якості інновації, інноваційного потенціалу та інноваційної діяльності. Приведено теж основні положення пов'язані зі стандартним управлінням тобто принципи такого управління, приблизний вид необхідних і склад необхідної документації.

В статье представлено общие вопросы управления инновациями и применяемые способы такого управления. Предложено численное разграничение между инновацией и экоинновацией. Приведено предложения по стандартному управлению инновационной деятельностью и предложение численного расчета качества инновации, инновационного потенциала и инновационной деятельности. Приведено теж основные положения связанные со стандартным управлением т.е. принципы такого управления, примерный вид требуемых и состав необходимой документации.

This paper presents the general issues of innovation management and how to apply such controls. The numerical distinction between innovation and ecoinnovation. We give suggestions for the standard management of innovation and the offer of a numerical calculation of quality innovation, innovative capacity and innovation. We give also the main provisions relating to the standard that is controlled principles of such management, the approximate form of the required and necessary documentation.

ВВЕДЕНИЕ. Одной из главных задач управления предприятиями является постоянное совершенствование его конкурентоспособности с помощью следующих мероприятий:

- а) инновационного совершенствования производимых продуктов,
- б) инновационного улучшения применяемых технологий производства,
- в) устранения проблем и недостатков во всех видах деятельности предприятия направленных на исключение расточительности и улучшение рабочей среды в том же экологических условий.

По этим вопросам разработано много различных методов поддерживающих управление [1, 2, 3] из которых особенно полезными оказались стандарты управления разрабатываемые через международную организацию ИСО и другими организациями. При ИСО создан недавно новый технический комитет названный «Управление инновациями», который начал разрабатывать новую серию стандартов по управлению инновациями наверное в способ дающий возможность его интеграции с существующим стандартом по управлению качеством ИСО 9001. Ожидая на эти стандарты уже сейчас можно воспользоваться требованиями по управлению находящимися в различных стан-

дартх, которые косвенно поддерживают тоже инновационную деятельность. Можно тут указать следующие стандарты:

- а) Разработанный стандарт ИСО 26000 направлен на вызвание удовольствия трудящихся при котором возрастает их потенциальные возможности изобретательства.
- б) Разрабатываемая серия стандартов по управлению проектами ИСО 21000 (на пример ИСО 21500)обеспечивающий правильное планирование и организацию проектных работ в том числе тоже инновационных.
- в) Разработанные стандарты серии ИСО 31000 по управлению риском, который неизбежен тоже при инновационной деятельности.
- г) В уже разработанных стандартах ИСО 9004, ИСО 10006, ИСО 10014 [4, 5, 6] многие требования направлены на улучшение конкурентоспособности организации и косвенно поддерживают инновационную деятельность.

Ожидая появления стандартов по управлению инновациями можно предложить способы такого управления инновационной деятельностью конкретного предприятия учитывая его характерные черты и одновременно интегрируя его с существующими в организации другими стандартными системами. (на пример ИСО 9001, ИСО 14001, ОХСАС 18001, ИСО/ИЕЦ 27001 и др.)

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСОВ УПРАВЛЕНИЯ ИННОВАЦИЯМИ. Из-за значения для конкурентоспособности инновациям посвящено очень много работ ученых и практиков являющихся обычно результатом определенных исследований, в конкретных условиях и обобщающих накопленные знания по этому вопросу. Обращается внимание на необходимость подготовки и управления инновационным потенциалом [7], умелое управление инновационным проектом [8], вопросам интеграции стратегического и инновационного управления [9], учета динамики развития в инновационной деятельности [10], учета технологии в развитии инновационного производства [11], значение творческого управления в появлении идеи инновации [12, 13], необходимости разработки стандартов управления инновационной деятельностью [14, 15] и др.

Работы ИСО по созданию стандартов управления инновациями свидетельствуют, что создалось общее мнение об полезности такого управления. В стандарте этом, так как в других стандартах управления, будут наверное требования, которых исполнение организациями может происходить по разному. Эффективное управление включает тоже способы точного численного измерения значения инновации, инновационного потенциала и инновационной деятельности. Тут тоже много различных предложений, разработанных на примере частных случаев, пригодных для рассматриваемых условий. Универсальные методы построены на основании различных критерий и они не во

всех случаях дают желаемые результаты [16]. По этому поводу попытки создания универсальной и гибкой методы оценки инноваций, пригодной для различных обстоятельств являются желаемыми.

ИННОВАЦИИ И ЭКОИННОВАЦИИ. Как известно инновациями называются все новые изменения продуктов, процессов и управления, которые наши практическое и рыночное применение и принесли организации определенные пользы [1]. Такие же инновации, которые улучшают какой нибуть экологический аспект (на пример уменьшение энергоёмкости, материалоемкости, трудоёмкости, отходов, запылений и др.) независимо от степени этого уменьшения обычно считают экоинновацией, даже тогда когда другие, не-экологические аспекты довольно большие. Из-за этого разграничение инновации от экоинновации довольно трудное и обречено субъективными мнениями. По этой причине обоснованным является создание объективного разграничения инновации и экоинновации. Разграничения эти могут быть различными в зависимости от экологических обстоятельств конкретной организации. Можно это сделать следующим, поэтапным способом:

1. Определить в какой мере определенная, введена инновация улучшила экономические показатели (лучше всего один комплексный показатель) организации по сравнению с ранней ситуацией (без этой инновации). Можно это приблизительно выразить процентным соотношением рассматриваемого показателя с инновацией к аналогичному показателю в ситуации без этой инновации.
2. Определить в какой степени введенная инновация повлияла на уменьшение экологического аспекта (или комплекса аспектов) по сравнению с ситуацией перед внедрением инновации в процентном соотношении.
3. Сравнение степени приращения экономических выгод (в процентах) со степенью уменьшения экологических аспектов (в процентах). Если соотношение это будет меньше единицы то это показывает на экологическую природу инновации и можно ее назвать экоинновацией. В организациях, где экологические аспекты важны можно принимать другие значения этого соотношения (например, несколько больше единицы)

Требования равномерного развития и заботы за окружающей средой должны направлять усилия управления организацией на увеличение количества и качества экоинновацией различными способами. Таким способом является интегрирование таких стандартов как: ИСО 9001, ИСО 26 000, ИСО 31000 и др. Это содействует развитию интеллектуальных возможностей персонала и улучшению рабочей среды, что приводит к росту интенсивности инновационной деятельности.

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ИННОВАЦИИ. Проявление экоиновации неразрывно связано с общим управлением и подходом к поддержке инновационной деятельности. Это требует, между прочими, тоже проведения точных, численных оценок инновации и их влияния конкурентоспособность организации. Оценки экоиновации и инновации должны проводиться одинаковым способом. Для оценки необходимо избрать определенные критерия, которые могут меняться в некоторой степени, чтоб лучше учитывать особенности организации. Оценка в каждом критерии должна проводится по запроюктированной, балловой шкале при чем можно пользоваться 5-балловой, 10-балловой или процентной но самой выгодной является 5-балловая шкала (1 – означает самую плохую ситуацию а 5 самую желанную). Имея критерии и шкалы можно провести аудит или экспертный осмотр инновации, принять частные оценки по каждому критерию и если надо принять определенные весовые коэффициенты и на этом основании провести комплексный расчет оценки инновации. Предлагается принимать следующее критерии оценок [15]:

1. Степень новости инновации зависящую от творческого аспекта проявляющегося в получении патентов, сертификатов, хранении промышленного образца и др.
2. Польза из внедренной инновации указывающая на степень улучшения эффективности и конкурентоспособности организации.
3. Степень универсальности инновации указывающий возможность ее применения в различных отраслях и увеличения пользы организации и общества (продажа лицензии, трансфер инновации).
4. Степень сложности инновации зависящая от трудоемкости (или стоимости) ее приготовления, проектирования и внедрения.
5. Период возврата внесенных капиталовложений выраженный в годах или месяцах.
6. Степень практического использования указывающая какие черты продуктов, процессов, окружающей среды исправились из-за внедрения инновации (могут то быть черты эстетические, эргономические, безопасности, экономические и др.).
7. Объект организации исправляемый инновацией – могут то быть рабочие станды, техпроцессы, рыночные продукты, организационные отделения и др.).
8. Прогнозированный цикл жизни инновации – до момента когда инновация устареет и потребуеться замена ее новой инновацией.
9. Отрасль промышленного применения инновации – можно их разделить на области от малой степени переработки к более сложной до отрасли высоких технологий.

221

10. Степень влияния инновации на системы изготовления изделий, при чем изделия могут быть самые разнообразные. Инновации могут уменьшать материалоемкость, энергоемкость, трудоемкость, или увеличивать функциональность, безопасность, надежность и др.

Комплексная оценка конкретной инновации может учитывать все выше указаны критерия или только некоторые, в случае необходимости можно ввести другие критерия характерные для специфичной деятельности рассматриваемой организации и после проведения оценочного аудита рассчитать оценку как среднюю арифметическую или с учетом соответствующих весовых коэффициентов.

ОЦЕНКА ИННОВАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА ОРГАНИЗАЦИИ.

Все ресурсы организации и ее строение, которые увеличивают вероятность образования инновации можно назвать инновационным потенциалом организации [15]. Возможности этого потенциала для увеличения конкурентоспособности организации может быть вполне использована если руководство сможет измерить состояние и возможности этого потенциала. В общий инновационный потенциал организации входят следующее его частные элементы:

1. Потенциал маркетинговых отделений характеризуется степенью развития процессов связанных с обслуживанием клиентов и заказчиков и распознания их желаний и степени удовольствия с полученных изделий и их предложений для организации.
2. Потенциал отделений НИР и их возможности по темпам разработки новых изделий и процессов и прибылей получаемых организацией из-за их продажи.
3. Потенциал отделений технологии и производства характеризующий степенью использования производственных мощностей и прибылью получаемой с продажи изготавливаемых изделий – рациональное использование этих ресурсов содействует уменьшению себестоимости продуктов.
4. Интеллектуальный потенциал персонала организации измеряемый уровнем образования, уровнем имеющихся компетенции, активностью персонала в рационализации.
5. Стиль и система управления руководством организации характеризуется количеством нововведений, прибылью с продажи новых продуктов, уровнем конкурентоспособности.
6. Потенциал внедренных и применяемых информационных систем характеризуемый количеством информации получаемой извне и перерабатываемой для практического использования и систем автоматизации.

222

зирующих и оптимизирующих различные виды деятельности организации.

7. Потенциал внешних связей организации характеризуется пользами из этих связей с клиентами, поставщиками, научными учреждениями и другими предприятиями.
8. Финансовый потенциал характеризуется возможностью образования прибыли, финансирования новых разработок, рационального использования ресурсов и обеспечения развития организации.
9. Культурный потенциал организации характеризуется определенной культурой организации, умением сотрудничества и разрешения конфликтов, быстрой адаптацией к новым условиям и др.

Общий потенциал организации можно рассчитать приняв балловые шкалы оценок в каждом виде потенциала, проведении экспертных оценок по каждому потенциалу и расчет средней арифметической или с учетом принятых весовых коэффициентов.

СТАНДАРТНЫЕ УКАЗАНИЯ КАСАЮЩЕЕСЯ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ.

Пока не опубликован стандарт ИСО по управлению инновациями можно предложить основные требования к такому управлению руководствуясь накопленным опытом по управлению инновациями и существующими стандартами управления другими видами деятельности – качеством, окружающей средой, безопасностью, риском, проектами, информацией и др. Для выявления основных положений управления необходимо сначала выяснить вопросы этапной реализации инновационной деятельности, основных принципов такой деятельности и основных процессов которые должны быть запроюктированы или перепроюктированы для успешного управления инновациями. На основании этих разработок можно определить основные требования стандартной документации и установит способ оценки инновационной деятельности увеличивающей вероятность образования потребности инновации. Очередность реализации инновационного процесса выяснена и состоит из следующих основных этапов:

1. Разработка творческой, изобретательской идеи, которая в итоге может стать инновацией. Это сложный и трудный этап инновационного процесса в котором мало стандартных действий но много управления творчеством. Для увеличения вероятности появления требуемого решения применяют различные методы из которых лучшей считается метод ТРИЗ разработанный Алтшуллером [12] и успешно развиваемый [13] многими глобальными корпорациями. Другие методы это: мозговой атаки, морфологический, синектики и др.

223

2. Оценка и селекция идей разработанных в первом этапе. Оценивается в основном пригодность для организации, возможность исполнения, ожидаемый риск, экономические выгоды. В этом этапе присходит тоже творческая корректировка идеи с целью ее приспособления к потребностям организации. Одобрена идея направляется для дальнейшей разработки в инновационном процессе.

3. Проектирование инновационного процесса с подробной разработкой всех необходимых вопросов – определение концепции, расчеты технические и экономические, анализ возможных вариантов и выбор наилучшего, разработка проектов и планов исполнения.

4. Реализация разработанного проекта по подготовленным планам и окончательная оценка пригодности разработанной инновации и ее использование в производственной или управленческой деятельности.

СТАНДАРТНЫЕ ПРИНЦИПЫ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ.

В инновационной деятельности важными остаются принципы управления качеством указаны в стандарте ИСО 9000 но с направлением на важные элементы инновационных процессов. Эти известные принципы должны быть направлены на:

1. Значение клиента – особенно на собрание и использование всех положительных, отрицательных и творческих замечаний касающихся деятельности организации.
2. Значение руководства – особенно в правильной разработке стратегии организации, указание персоналу приоритетных потребностей с созданием условий к творческой деятельности.
3. Значение трудящихся – особенно использование их знаний, креативности и увлечения в деятельности для развития организации.
4. Значение поставщиков – особенно выбор поставщиков обладающих передовой техникой и патентными решениями содействующими конкурентоспособности.
5. Процессный подход – означающий необходимость разработки процессов содействующих инновационной деятельности
6. Системный подход – означающий необходимость создания системной структуры организации содействующей образованию и внедрению инновации.
7. Подход основан на данных и фактах – связанный с потребностью системного анализа потребностей по инновациям и использования всех доступных знаний для разработки требуемых инновации
8. Постоянное совершенствование деятельности – особенно инновационным способом с использованием доступных ресурсов.

Указанные направления принципов управления качеством могут оказаться достаточными в начале разработки и внедрения стандартного управле-

224

ния инновациями, но в ситуации потребности значительного увеличения конкурентоспособности путем радикальных изменений и значительных инноваций необходимо обратить внимание и воспользоваться следующими принципами инновационного управления:

1. Точная идентификация потребностей клиентов и внешних заинтересованных организаций (банки, страховые компании, собирающие наложенные платежи и др.) и поиски оптимального решения потребностей.
2. Точное стратегическое планирование развития производимых изделий и технологических процессов их изготовления направляющие инновационную активность персонала.
3. Разработка инфраструктуры содействующей реализации процессов в инновационном управлении организацией – это определенные организационные структуры, которые образуют необходимые знания или привлекают их извне, поддерживают работу инноваторов, обеспечивают необходимые ресурсы для инновационной деятельности и др.
4. Максимализация образования и использования инновационного потенциала организации содействующая его укреплению и питанию необходимыми ресурсами.
5. Разработка и улучшение групповых методов сотрудничества, специальная подготовка их лидеров и обучение нужных методов и техник совместных работ.
6. Содействие образованию интеллектуального капитала организации состоящего из капитала знаний персонала, клиентов и структурного (организационный, процессный и инновационный).
7. Содействие развитию предпринимчивости, изобретательства и увлеченности работой трудящихся организации.
8. Развитие внешних, сетевых связей направленных на поддержку знаний, стратегии и действий организации содействующих инновационным достижениям.

ОСНОВНЫЕ СТАНДАРТНЫЕ ПРОЦЕССЫ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ. Установление стандартного управления инновациями предусматривает необходимость принятия процессного подхода и такую подготовку документации, чтоб была возможность интегрирования этой системы с системами ранее внедренными. Требование это решается проектируя систему согласно со схемой PDCA, проектируя системы питания, управления и регулирования процессами с элементами необходимого надзора. В организациях уже существуют многие и требуемых процессов, но они часто без надзора и без продуманного способа реализации. Чтоб стандартная система управления инновациями эффективно функционировала необходима разработка, документирование и надзор над следующими процессами и подпроцессами [17]:

1. Процесс подготовки творческой идеи инновации
 - 1.1. Осознание потребности изобретательства и творческого мышления
 - 1.2. Идентификация потребностей инновации и источников поддержки изобретательства

225

- 1.3. Содействие зарождению инновационных идей
 - 1.4. Образование творческой идеи как начало инновации
 - 1.5. Оценка и начальный отбор инновационных идей
 2. Процесс разработки инновационных идей
 - 2.1. Образование проектной команды до разработки принятых идей
 - 2.2. Разработка инновационного проекта
 - 2.3. Планирование и реализация инновационного проекта
 - 2.4. Контроль и оценка реализации инновационного проекта
 - 2.5. Оценка эффективности введенной инновации
 3. Процесс эксплуатации введенной инновации
 - 3.1. Разработка стандартов применения инновации
 - 3.2. Употребление и совершенствование применяемой инновации
 - 3.3. Продажа, распространение и устранение устаревшей инновации
- Разработка и внедрение этих процессов требуют значительной поддержки руководства, установления руководителей процессов, систематического надзора процессов с помощью аудитов, мониторинга, установленных численных показателей и их желаемых значений, постоянного совершенствования путем корректировок и предупреждающих действий.

ПРИБЛИЗИТЕЛЬНАЯ СХЕМА СТАНДАРТА УПРАВЛЕНИЯ ИННОВАЦИЯМИ. Стандарт должен состоять из 5-ти главных разделов и подразделов содержащих требования к системе. Предлагается, чтоб были это следующее разделы [18]:

1. Общие вопросы: 1.1. Идентификация инновационных потребностей. 1.2. Идентификация инновационных процессов, 1.3. Документация и необходимые записи,
 2. Задачи и ответственность руководства: 2.1. Разработка стратегии и политики инновационной деятельности, 2.2. Поддержка понимания потребностей инновации и инновационных действий, 2.3. Развитие требуемых ресурсов и их распределение, 2.4. Установление и развитие внешних контактов по инновациям, 2.5. Надзор над системой и ее периодический просмотр
 3. Ресурсы и инфраструктура инновационного управления: 3.1. Прием и набор специалистов и их обучение, 3.2. Внутренняя и внешняя коммуникация, 3.3. Привлечение персонала к инновационным работам, 3.4. Внутренняя поддержка изобретателей, 3.5. Информационная поддержка изобразительства с базами данных.
 4. Зарождение и реализация инновации: 4.1. Поддержка образования инновации, 4.2. Селекция, отбор и реализация инновационных идей, 4.3. Эксплуатация внедренной инновации.
 5. Совершенствование инновационной системы: 5.1. Периодический просмотр инновационной стратегии, 5.2. Измерения интеллектуального капитала организации, 5.3. Периодическая оценка инновационного потенциала, 5.4. Совершенствование научно-исследовательской деятельности, 5.5. Аудит, мониторинг и документирование инновационной деятельности, 5.6. Корректирующее и предупреждающее действия.

226

ДОКУМЕНТАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИННОВАЦИЯМИ.

В каждой организации проводятся управленческие действия направлены на улучшение конкурентоспособности различными методами в том числе инновационными усилиями. Каждую такую систему можно стандартизовать разрабатывая комплект необходимых документов разработанных группами ответствующих специалистов и утвержденных руководством. Разработанные документу должны содержать требования стандарта, учитывать ситуацию организации и является совместимыми с другими управляющими документами. Чтобы система могла эффективно существовать необходимыми являются следующее документы [18]:

1. Стратегия и инновационная политика организации.
2. Процедуры – описание реализации важных процессов системы
3. Инструкции к важным рабочим местам системы (по мере необходимости)
4. Проекты формуляров для подтверждения реализации важных действий (записи системы)

К важным процедурам, необходимым для системы относятся следующее (их можно разделить на 5 групп IPDCA – I – инфраструктура, P – plan, D – do, C – check, A – action). В этих группах предлагается разработка следующих процедур:

- (I) 1. Образование инновационной культуры организации
2. Внутренняя и внешняя коммуникация поддерживающая инновации
3. Развитие собственных и привлечение внешних знаний поддерживающих инновации
4. Финансирование инновационной деятельности
- (P) 5. Исследование инновационных потребностей
6. Работы по исследованиям и развитию
7. Составление и совершенствование проектных команд
8. Проектирование инновационных проектов и мероприятий
- (D) 9. Процессы учебы и образования персонала
10. Планирование и внедрение инновационных проектов и мероприятий
11. Установление надзора над процессами
- (C) 12. Аудиты процессов и системы
13. Корректирующие и предупреждающие действия
14. Практическое исследование пригодности инновации
- (A) 15. Просмотры руководством системы управления инновациями
16. Измерения и мониторинг интеллектуального капитала
17. Мониторинг и исследование изменений (внешних и внутренних) и осознание потребности новых инновации.

227

ОЦЕНКА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИННОВАЦИЯМИ.

Комплексная оценка эффективности функционирования системы управления инновациями является сложным вопросом, который можно решить применяя метод похожий на самооценку управления качеством по критериям EFQM с введением необходимых изменений. Для выбранных критериев можно разработать 5-тибалльные шкалы и провести приближительную оценку аналогично как предложено оценивать инновационный потенциал и конкурентоспособность инновации. Для более точной оценки принимается две группы критериев, в которых оценку ведется по модульным вопросам и присвоенным моделью количеством баллов (максимально возможное общее количество это 1000 баллов). Первая группа критериев характеризует состояние организации и ее процессы и они следующее [15]:

1. Руководство и его инновационная активность
 2. Учет инновационных вопросов в стратегии и политике организации
 3. Инновационные процессы
 4. Ресурсы необходимые для инновационной деятельности
 5. Организационная структура поддерживающая инновации
 6. Уровень развития интеллектуального капитала
- Вторая группа критериев направлена на оценку результатов инновационных действий:
7. Творческая и изобретательская деятельность персонала
 8. Изменение конкурентоспособности организации
 9. Влияние организации на внешнюю среду
 10. Финансовые результаты организации в том числе ее инновационные успехи

Для отдельных критериев разработано модульные вопросы (5 – 7 модулей), предложено количество балльных оценок за модуль (10 – 28), и за критерий (60 – 140). Для оценки принимается степень использования модуля (0 – 100%) и степень документационного подтверждения исполнения (0 – 100%). Полученное количество баллов в оценке проведенной экспертной группой свидетельствует об степени исполнения критериев. В методе возможен подбор других критериев и присвоенных им баллов, разработка других модульных вопросов и их количества. Что делает метод очень гибким.

ВЫВОДЫ.

1. В каждой организации возможно разработать стандартную систему управления инновациями учитывающую особенности организации и ее потребности по инновационным вопросам.
2. С целью совершенствования системы управления инновациями следует ввести методы самооценки инновационного потенциала, инновационной деятельности и конкурентоспособности инновации.
3. Для правильного функционирования системы управления инновациями необходимо разработать документы, особенно процедуры важных процессов, утверждать их и применять.
4. Для правильного функционирования необходимо установить управление и надзор над процессами – менеджеров процессов, мониторинг показате-

228

лей, проводить периодические аудиты, вести корректирующие и предупреждающие действия и др.

5. Руководство должно периодически (на пример один раз в год) проводить просмотры системы анализируя ее положительные и отрицательные черты и вводить изменения совершенствующие систему.

Список использованных источников: 1. Drucker P.F.: Natchnienie i fart czyli innowacje i przedsiębiorczość. EMKA Warszawa 2004; 2. Nonaka I., Takeuchi H.: Kreowanie wiedzy w organizacji. Poltext, Warszawa 2000; 3. Pomykalski A.: Innowacje. WPL, Łódź 1997; 4. PN-EN ISO 9004:2010 – Zarządzanie mające na celu osiągnięcie trwałego sukcesu organizacji - Podejście poprzez zarządzanie jakością. PKN Warszawa; 5. PN-ISO 10006 – System zarządzania jakością. Wytyczne dotyczące zarządzania jakością w przedsiębiorstwach. PKN, Warszawa; 6. PN-ISO 10014 – Zarządzanie jakością. Wytyczne do osiągania korzyści finansowych i ekonomicznych. PKN Warszawa; 7. Карпов Э.А., Ченцова Е.П. и др.: Управление инновационным потенциалом промышленных предприятий. ТНТ, Старый Оскол 2001; 8. Управление инновационными проектами. Ред. В.Л. Попова. ИНФРА-М, Москва 2007; 9. Профимова А.А.: Оценка эффективности инновационного развития предприятия. Финансы и Статистика, Москва 2001; 10. Мясин М.Г.: Динамический образ инновации. ООО Витус-К, Москва 2006; 11. Воронцова А.И., Поляничков Ю.И. и др.: Системный метод прогнозирования технологий и производства продукции. Глобус, Москва 2006; 12. Алтшуллер Г.: Нанити идея. Введение в ТРИЗ. Стинг. Коман. Корп. Москва 2008; 13. Шаповалов Н.: Деревя эволюции Пульс, Москва 2006; 14. Lunarski J., Stadnicka D.: O możliwościach standaryzacji zarządzania innowacjami. MARR, Mielec 2006; 15. Lunarski J.: Techniczno-organizacyjne aspekty konkurencyjności. OW PRZ Rzeszów 2008; 16. Jasiński A.H.: Innowacje i transfer techniki w procesie transformacji. Difin Warszawa 2006; 17. Zarządzanie innowacjami. Podstawy zarządzania innowacjami. Red. J. Lunarski. OW PRZ Rzeszów 2007; 18. Zarządzanie innowacjami. System zarządzania innowacjami. Red. J. Lunarski. OW PRZ Rzeszów 2007

Поступила в редакцию 15.06.2012

УДК 621.91

Манохин А.С., канд. техн. наук,
Клименко С.А., д-р техн. наук, Киев, Украина
Криворучко Д.В., д-р техн. наук, Сумы, Украина
Рыжов Ю.Э., канд. техн. наук, Найдено А.Г., канд. техн. наук, Киев, Украина

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛЛОПТИКИ, ОБРАБОТАННЫХ АЛМАЗНЫМ МИКРОТОЧЕНИЕМ

Наведено результати комп'ютерного моделювання стану поверхневого шару деталей металоптики з алюмінієвого сплаву при алмазному мікроточінні. Розглянуто вплив на ступінь пластичної деформації поверхневого шару виробу режимів різання і геометричних параметрів різця з монокристалічного алмазу.

Представлены результаты компьютерного моделирования состояния поверхностного слоя деталей металлоптики из алюминийевого сплава при алмазном микроточении. Рассмотрено влияние на степень пластической деформации поверхностного слоя изделия режимов резания и геометрических параметров резца из монокристаллического алмаза.

The results of computer modeling of surface layer of alumin metal optic parts under conditions of diamond turning has been shown. The influence of cutting conditions and geometric parameters of a single-crystal diamond tool on the surface layer strain are discussed.

Введение. Моделирование процесса резания методом конечных элементов является актуальной темой современных научных исследований в области металлообработки. За более чем тридцатипятилетнюю историю развития этого направления различными научно-исследовательскими школами было разработано большое количество моделей рабочих процессов резания как в 2D, так и в 3D постановке, моделирующих образование как сливной, так и элементной стружки, использующих универсальное (ABAQUS, DEFORM, LS-DYNA) и специальное (ThirdWave AdventEdge) коммерческое программное обеспечение, а также и разработанный исследовательский программный код. Значительный вклад в развитие указанного научного направления внесли проф. Usui E., Strenkovski J. S., Shih A. J., Childs T. H. C., Altan T., Jawahir I. S., Klocke F., Остафьев В. А. и др.

Целью данного исследования является оценка характера и степени влияния геометрических параметров инструмента и режимов обработки на состояние поверхностного слоя изделий металлоптики из алюминиевых сплавов при алмазном микроточении.

Методика моделирования. Среди исходных данных для компьютерного моделирования одними из наиболее важных являются данные о механических свойствах обрабатываемого материала, т.е. о связи между деформация-

ми и напряжениями в нем. Эти свойства описываются определяющим уравнением и уравнением состояния.

В качестве определяющего уравнения в работах, посвященных изучению процессов пластической деформации различных материалов с помощью МКЭ, широко используется известная модель Джонсона-Кука

Для определения коэффициентов уравнения Джонсона-Кука была проведена серия специальных экспериментов в соответствии с методикой [1].

С этой целью из алюминиевого сплава АМг5 (табл. 1), в соответствии с требованиями ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84), были изготовлены специальные образцы, которые подвергались испытаниям на растяжение при температурах 25 °С, 200 °С, 400 °С.

Коэффициенты уравнения A, B, n, m , определяли, решая систему уравнений с учетом механических свойств алюминиевого сплава АМг5 (условного предела прочности ($\sigma_{0.2}$), относительного сужения (ψ_k) и относительной деформации (ϵ), полученных в ходе испытаний [1].

$$\begin{cases} \sigma_{0.2}(1+0,002) = A + B(0,002)^n \\ Bn(\epsilon^p)^{n-1}(1+\epsilon^p) = A + B(\epsilon^p)^n \\ Bn(\epsilon^p)^{n-1} = \sigma_B \\ A + B \left(\frac{\psi_k}{1-\psi_k} \right)^m = \begin{cases} \sigma(1+1,35\psi_k) & \text{при } \psi_B \leq 15\% \\ \sigma(0,85+2,06\psi_k) & \text{при } \psi_B > 15\% \end{cases} \end{cases}$$

Для решения системы уравнений и определения коэффициентов применялось специальное программное обеспечение, данные расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Коэффициенты определяющего уравнения

A, МПа	B, МПа	n	C	m
147	400	0,55	–	0,488

В методике реализованы геометрический и физический критерии разрушения. В качестве геометрического критерия, разделяющего материал перед режущей кромкой, используется перестроение КЭ сетки инструмента после прохождения заданного пути резания. Использование этого критерия позволяет предотвратить искажение КЭ в области больших пластических деформаций и увеличить тем самым скорость и устойчивость расчета. При моделировании применялось двумерное r-адаптивное перестроение сетки конечных элементов, используемых в задачах с плоской схемой деформации. Алгоритм, реализованный в программе LS-DYNA, создает новую сетку на основе внешней границы старой сетки. Размер генерируемых элементов определяется па-

аметром ADAPTOL, устанавливающим их граничную величину [2]. Время начала (TBIRTH) и конца (TDEATH) перестроения сетки определяется начальным и конечным моментами моделирования. Параметр, устанавливающий интервалы времени между перестроениями (ADPFREQ) принят равным удвоенному промежутку времени необходимому для прохождения инструментом расстояния соответствующему длине элемента вдоль оси X ($\Delta t = 2\Delta x/v$). Такой выбор интервалов перестроения обеспечивает минимизацию ошибки расчетов при минимально допустимом уровне удаленных, вследствие превышения накопленной деформацией величины физического критерия разрушения, элементов, а значит, ограничивает и уровень общей потери массы в модели обрабатываемого материала.

В качестве физического критерия разрушения пластически деформируемого материала принят критерий накопленных пластических деформаций в форме Джонсона-Кука [2]:

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon_f} \geq 1,$$

где $\epsilon_f = (D_1 + D_2 \cdot \exp(D_3 \sigma^*)) \left(1 + D_4 \ln \epsilon \right) (1 + D_5 T)$, $D_1 - D_5$ – эмпирические коэффициенты.

Коэффициенты для выражения, определяющего критерий разрушения, получаются с использованием тестов на растяжение-сжатие либо по литературным данным. Так на рисунке 1 представлен график зависимости критерия разрушения ϵ_f от относительного гидростатического давления σ_m/σ , построенный по данным диаграммы, приведенной в [3].

Для анализа результатов расчетов используется графический интерфейс, представленный программой LS-PREPOST, которая дает возможность просмотра полей напряжений и деформаций. Проведение предварительного расчета показателей напряженно-деформированного состояния обрабатываемого материала, модель которого определена в виде предложенном Джонсоном-Куком, с использованием полученных констант (табл. 1) позволило определить величины средних напряжений (гидростатического давления)

$$p = -\sigma_m = -\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

и эквивалентных напряжений (von Mises stress)

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

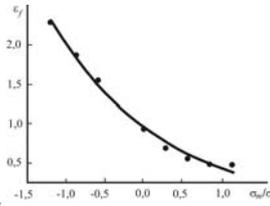


Рисунок 1 – Диаграмма пластичности алюминиевого сплава АМг5

В диапазоне условий обработки данные величины вблизи режущей кромки инструмента достигают значений $\sigma_m = 0,36$ и $\sigma = 0,296$ ГПа, а эквивалентное среднее давление – 1,22. Соответственно величина накопленной деформации для $\sigma_m = 0,36$ и $\sigma = 0,296$ ГПа составляет $\varepsilon_f = 2,3$.

При решении термомеханической задачи граничные условия состояли в жестком закреплении опорной поверхности заготовки и перемещении абсолютно-жесткого инструмента вдоль оси X заготовки с постоянной скоростью v и глубиной резания. В ходе расчета решалась 2D задача с учетом теплопроводности. Свойства материалов представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Теплофизические свойства материалов

Материал	$T_{пл}, ^\circ\text{C}$	$C_m, \text{Дж/кг}\cdot\text{K}$	$\lambda, \text{Вт/м}\cdot\text{K}$	$E, \text{ГПа}$	ν	$\rho, \text{кг/м}^3$
Алмаз	–	420	1000	1050	0,1	3520
Алюминий	600	920	120	73	0,33	2650

Схема процесса моделирования показана на рис. 2

В табл. 3 приведены условия обработки, устанавливавшиеся в ходе численных экспериментов с применением разработанной методики.

Решение контактной задачи выполнялось методом штрафов (алгоритм *CONTACT_2D_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE).

Трение на контактных площадках между инструментом и деталью при моделировании наиболее часто описывается уравнением Show M.C.

$$\tau_{\max} = \min\left(\mu(T, \sigma_n) \sigma_n; m \sigma_{\text{тек}}\left(\varepsilon^p, \varepsilon^p, T\right)\right),$$

где m – константа, определяемая экспериментально.

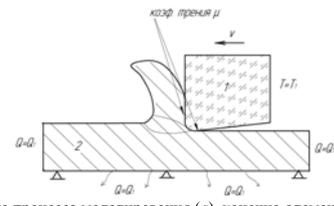


Рисунок 2 – Схема процесса моделирования (а), конечно-элементная модель реза (б)

Таблица 3 – Условия численных экспериментов

Варьируемые факторы	Стабилизированные факторы
$\rho = 50, 100, 150$ нм	$a = 150$ нм, $v = 60$ м/мин, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$
$a = 50, 150, 250$ нм	$\rho = 50$ нм, $v = 60$ м/мин, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$
$v = 60, 120, 180$ м/мин,	$a = 150$ нм, $\rho = 50$ нм, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$
$\gamma = -10^\circ, 0^\circ, 10^\circ$	$a = 150$ нм, $\rho = 50$ нм, $v = 60$ м/мин, $\alpha = 10^\circ$

В LS-DYNA применяется аналогичная методика и максимальная сила трения ограничивается величиной $F_{\max} = A_c \cdot \nu C$, где A_c – площадь контакта, и νC – коэффициент вязкого трения, который можно определить по формуле: $\nu C = \sigma_s / \sqrt{3}$. Такая величина силы трения характерна для участка пластического контакта. На участке, где контакт является упругим, коэффициент трения монокристаллического алмазного инструмента по алюминию принимался постоянным и равным $\mu = 0,2$ [4].

Результаты моделирования. На рис. 3, а–г показаны модель процесса стружкообразования и распределение эквивалентных напряжений (по Мизесу) в объеме зоны резания в различные моменты времени при алмазном микрооточении заготовки из алюминиевого сплава АМг-5. При врезании инструмента в обрабатываемый материал напряжения в зоне деформации быстро возрастают до величин 0,27–0,29 ГПа (рис. 3, а), степень деформации материала удаляемого в стружку в приконтактной зоне составляет 2,0–2,2, в объеме стружки (середина ее толщины) – 1,3–2,0 ($v = 60$ м/мин, $a = 150$ нм, $\rho = 50$ нм, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$). Нужно отметить, что напряжения в зоне первичных деформаций значительно превосходят предел текучести недеформированного алюминиевого сплава АМг5 (0,147 ГПа), что свидетельствует о его интенсивном упрочнении в зоне стружкообразования. Степень поперечной усадки стружки составляет $\zeta = 2,2$.

Путь резания при моделировании составлял 36 мкм, что соответствует 24-м толщинам среза. Такая длина, в соответствии с общепринятой при конечно-элементном моделировании процессов лезвийной обработки практикой, доста-

точно для адекватной оценки параметров стружкообразования в установившемся режиме резания. После достижения отмеченной длины обработки (рис. 3 в), нагрузка с заготовки снимается и в течение 0,096 с (до 20 мс) происходит расчет релаксации напряжений и упругого восстановления материала заготовки.

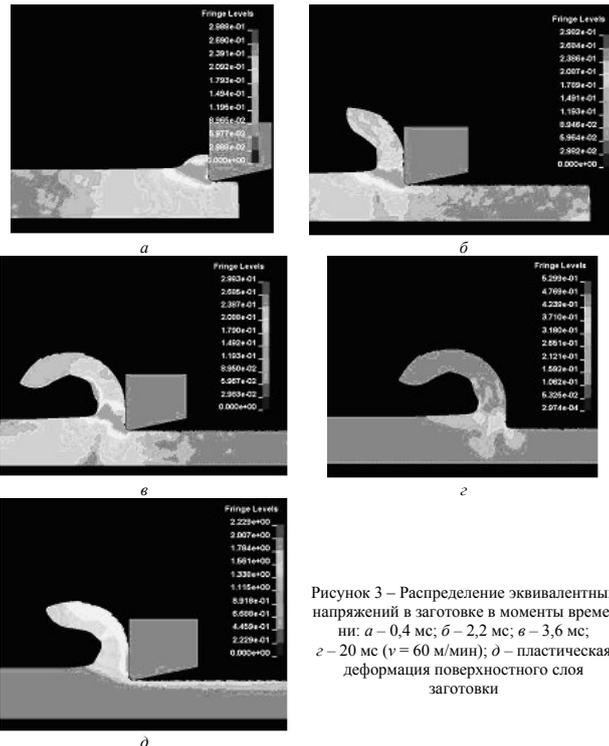


Рисунок 3 – Распределение эквивалентных напряжений в заготовке в моменты времени: а – 0,4 мс; б – 2,2 мс; в – 3,6 мс; г – 20 мс ($v = 60$ м/мин); д – пластическая деформация поверхностного слоя заготовки

Распределение эквивалентных напряжений в заготовке и стружке после останова моделирования процесса резания и последующей релаксации напряженно-деформированного состояния показано на рис. 3, е.

Для сравнительной оценки влияния переднего угла алмазного инструмента на напряженно-деформированное состояние материала в зоне резания на рис. 4 представлены результаты моделирования резания резцом с $\gamma = 10^\circ$. Остальные условия обработки аналогичны предыдущему расчету. Как видно, в данном случае, эквивалентные напряжения (рис. 4, а) практически не изменяют своей величины, а степень пластической деформации (рис. 4, б) удаленного в стружку материала несколько ниже. Так в приконтактной зоне $\varepsilon = 1,8$ –1,95, а в объеме стружки $\varepsilon = 1,15$ –1,3. Усадка стружки также несколько меньше – ее значение не превышает $\zeta = 2,1$.

Параметры напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя обработанных изделий являются факторами, в значительной степени обуславливающими их функциональные показатели. Высокие напряжения, действующий в зоне резания, давление на контактной поверхности окруженного участка режущей кромки и задней поверхности реза с обрабатываемым материалом, упруго-пластически подминаемым алмазным инструментом, обуславливают нагружение поверхностного слоя изделия, приводя к его упрочнению и возникновению остаточных напряжений.

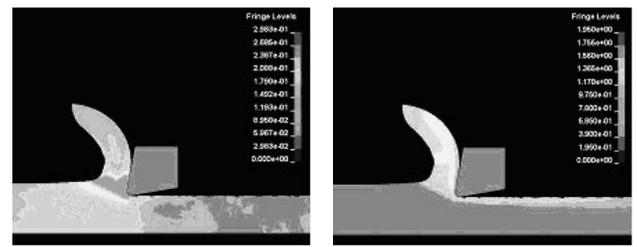


Рисунок 4 – Распределение эквивалентных напряжений в заготовке в моменты времени: а – 0,4 мс; б – 10 мс ($v = 60$ м/мин)

Эпюры распределения степени деформации ε по глубине поверхностного слоя заготовки для различных условий обработки и геометрических параметров инструмента показана на рис. 5. Графики демонстрируют зависимость величины эффективной пластической деформации от условий процесса алмазного микрооточения по мере увеличения силового воздействия на обрабатываемый материал с ростом толщины среза и радиуса округления режущей кромки.

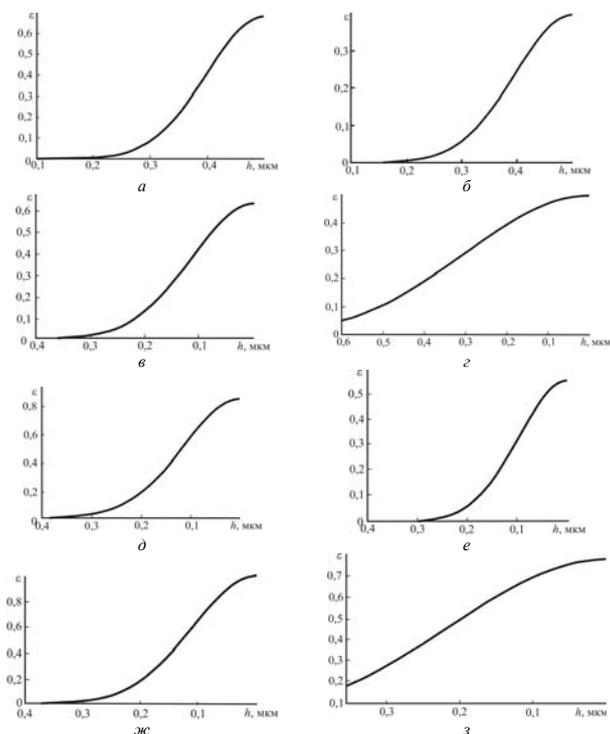


Рисунок 5 – Эпюры распределения эффективной пластической деформации материала по глубине поверхностного слоя для условий резания ($\alpha = 10^\circ$): а – $\gamma = 0^\circ$ ($v = 60$ м/мин, $a = 150$ нм, $\rho = 50$ нм); б – $v = 60$ м/мин; в – $v = 10$ м/мин, ($\gamma = 10^\circ$, $a = 150$ нм, $\rho = 50$ нм); г – $v = 180$ м/мин, $\rho = 50$ нм; д – $v = 60$ м/мин, $\rho = 10$ нм ($\gamma = 0^\circ$, $a = 150$ нм.); е – $a = 50$ нм; ж – $a = 150$ нм; з – $a = 250$ нм ($\gamma = 0^\circ$, $v = 60$ м/мин, $\rho = 150$ нм)
 Наиболее интенсивной деформации подвергается слой заготовки толщиной 0,2–0,27 мкм, что соответствует 1,3–1,7 толщины среза.

237

Наибольшее влияние на данный параметр оказывает острота кромки режущего инструмента – деформации в поверхностном слое изделия возрастают от 0,68 ($\rho = 50$ нм) до $\epsilon = 1$ при величине $\rho = 150$ нм.

Рост толщины среза также приводит к упрочнению обработанной поверхности, но степень влияния этого параметра менее интенсивна – с ее ростом в 5 раз, величина ϵ возрастает в 1,2 раза. Степень пластической деформации в зависимости от переднего угла реза составляет от 0,76 для реза $\gamma = 10^\circ$ до 0,4 при точении инструментом с передним углом $\gamma = 10^\circ$.

Известно [5], что в процессах обработки цветных металлов алмазным лезвийным инструментом температура резания относительно низка и находится в диапазоне 60–70 °С, тем не менее, зависимость механических свойств обрабатываемого материала от температуры обуславливает влияние скорости резания на параметры напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя. Рост скорости резания от 60 до 180 м/мин является причиной заметного (от $\epsilon = 0,68$ до $\epsilon = 0,4$) снижения величины пластической деформации материала упруго-пластически отгесняемого под заднюю поверхность инструмента. При этом наиболее интенсивное снижение данного параметра наблюдается с ростом скорости резания от 120 до 180 м/мин.

Влияние различных факторов процесса алмазного микроточения на степень деформации обработанной поверхности показано на рис. 6, их ранжирование по уровню влияния – на рис. 7.

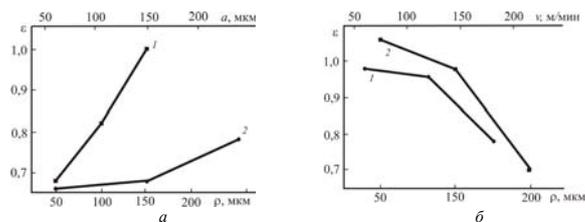


Рисунок 6 – Расчетные зависимости эффективной пластической деформации поверхностного слоя материала от параметров обработки: а – радиуса округления режущей кромки (1) и толщины среза (2); б – скорости резания (1) и переднего угла инструмента (2)

Выводы. Деформация материала поверхностного слоя изделий из алюминиевого сплава при алмазном микроточении определяется условиями обработки (режимами резания, геометрическими параметрами реза), достигая большой величины (до $\epsilon \sim 1$).

238

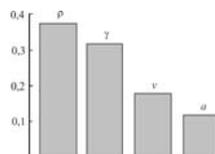


Рисунок 7 – Уровень влияния параметров обработки на степень деформации поверхностного слоя обработанных изделий

Процесс формирования поверхностного слоя обработанных изделий определяется явлениями, протекающими в зоне контакта передней поверхности и режущей кромки инструмента с обрабатываемым материалом. Толщина среза, радиус округления режущей кромки и передний угол реза обуславливают характер напряженно-деформированного состояния в зоне первичных деформаций, что в свою очередь определяет объем зоны, охваченной деформациями.

Повышение качества изделий металлооптики связано с формированием в их поверхностном слое зоны повышенной твердости, обеспечивающей при прочих равных условиях повышение отражательной способности обработанных поверхностей [6]. В этой связи, данные о влиянии условий алмазного микроточения на эффективную пластическую деформацию, полученных в ходе компьютерного моделирования процесса алмазного микроточения, дают возможность определить режимы обработки, способствующие повышению эксплуатационных характеристик оптических изделий: – для обеспечения эффективной деформации материала величиной 0,6–1,0 обработка должна производиться при скоростях резания 60–120 м/мин резцом с передним углом 0° , радиусом округления режущей кромки 100–150 нм; – толщина среза оказывает незначительное влияние на упрочнение обработанной поверхности, и в этой связи, ее величина должна определяться подачей, назначаемой из условия получения требуемой шероховатости обработанной поверхности.

Список использованных источников: 1. Криворучко Д. В. Наукові основи моделювання процесів різання з використанням числових методів [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05. 03. 01 / Д. В. Криворучко; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – Харків, 2010. – 37 с.; 2. Криворучко Д. В. Основи 3D – моделювання процесів механічної обробки методом скінченних елементів / Д. В. Криворучко, В. О. Залого, В. Г. Корбан. – Суми: Вид-во СумДУ, 2010. – 209 с.; 3. Колмогоров В. Л. Напряженне, деформация, разрушение / В. Л. Колмогоров. – Л.: Металлургия, 1970. – 229 с.; 4. Sathyan Subbiah, Shreyes N. Melkote. Effect of finite edge radius on ductile fracture ahead of the cutting tool edge in micro-cutting of Al2024-T3 // Sathyan Subbiah, Shreyes N. Melkote. // Materials Science and Engineering A 474 (2008) 283–300.; 5. Грубый С. В. Развитие метода алмазного микроточения на сверхточных станках для обработки отражающих поверхностей металлооптики // Технология металлов. – 1999. – №5. – С. 26–30.; 6. Технологическое управление отражательной способностью поверхностей деталей металлооптики алмазным микроточением / С.А. Клименко, М.Ю. Колейкина, А.С. Манюхин и др. // Инженерия поверхности и реновация изделий: Мат. 12-й междунар. науч.-техн. конф., 4-8 июня 2012 г., г. Ялта. – К.: АТМ Украины, 2012. – С. 107–109.

Поступила в редакцию 15.04.2012

239

УДК 621.91

М.Ш. Мигранов, д-р техн. наук, Уфа, Россия

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С ИОННОДИФИЦИРОВАННЫМ СЛОЕМ И ИЗНОСТОЙКИМ ПОКРЫТИЕМ

Наведено результати експериментальних досліджень трибологічних властивостей різального інструменту з покриттями.

Приведены результаты экспериментальных исследований трибологических свойств режущего инструмента с покрытиями.

The results of experimental studies of the tribological properties of coated cutting tools.

Технология улучшения свойств поверхности сравнительно недавно стало основным способом повышения износостойкости режущих инструментов и производительности лезвийной обработки резанием. Известно [1] несколько способов улучшения свойств: первый (и наиболее часто применяемый) – это разработка передовых составов покрытий для физического осаждения покрытий (ФОП) и второй – это предварительная обработка поверхности подложки. Применение износостойких покрытий для инструментов из быстрорежущей стали не могут гарантировать оптимальный результат без специальной обработки слоя подложки до нанесения твердого покрытия. Такая обработка поверхности обеспечивает эффект упрочнения подложки из быстрорежущей стали.

Одним из наиболее эффективных методов модификации поверхности режущих инструментов из быстрорежущей стали является обработка поверхности потоком ионов. Наиболее широко используемый метод такого типа обработки – ионное азотирование. Этот метод позволяет при резании повысить износостойкость инструментов из быстрорежущей стали в 1,3 – 1,5 раза. В то же самое время, азотированная подложка значительно (в 1,5 раза) повышает износостойкость инструмента с покрытиями после ФОП благодаря упомянутому выше эффекту. «Двойная» обработка поверхности, сочетающая в себе азотирование и нанесение твердого покрытия, перспективна к широкому использованию особенно для режущих инструментов из быстрорежущей стали. Именно такие технологические покрытия поверхности рассматривались как основные в данном исследовании.

Одним из способов улучшения режущих свойств инструментов является разработка нового вида многослойных покрытий, которые сочетали бы в себе повышенную износостойкость и антифрикционные свойства. Такие покрытия появились сравнительно недавно. Причина интереса к таким покрытиям объяснима. Известно, что высокая износостойкость инструментов с твердым по-

240

крытием определяется тем, что они функционируют в качестве экрана для контактирующих поверхностей инструмента, тем самым защищая их от внешнего воздействия при резании. В основном это происходит во время стационарной стадии износа (нормального износа). Однако, неизбежный износ покрытия приводит в дальнейшем к воздействию на базовый материал инструмента, фрикционные свойства которого значительно хуже свойств покрытия. В результате этого износ инструмента быстро вступает в свою катастрофическую фазу. Продление стадии нормального трения, однако, вполне осуществимо. Это достигается в многослойных покрытиях нанесением дополнительного нижнего слоя на поверхность основы инструмента. Этот слой должен сочетать в себе свойства и способности создавать защитные вторичные структуры в межфазовом слое покрытия и подложки.

Одним из способов создания таких слоев является ионная модификация (легирующая или смешивание) поверхности инструмента.

Целью данной работы является исследование влияния антифрикционного состава подложки на трибологические свойства режущего инструмента с такого рода покрытиями и определить наилучшую основу для разработки многослойных покрытий с программируемым изменением свойств, обеспечивающих для каждого слоя покрытия выполнение функции износостойкости на соответствующей стадии износа.

В данной работе мы исследовали многослойные триплексные покрытия. Покрытие было нанесено с помощью трех устройств. Используемая в качестве основы быстрорежущая сталь была предварительно азотирована в тлеющем разряде. Затем поверхность инструмента была модифицирована добавлением ионов до нанесения твердого покрытия. Наконец, модифицированный слой (Ti, Cr)N был покрыт с помощью ФОП - метода.

Ионное азотирование подложки из быстрорежущей стали производилось в специальном устройстве для ионного азотирования в сочетании с нагреванием. Технологические параметры были следующие: плотность тока в тлеющем разряде - 3 А/м²; время азотирования - 0,5 ч; давление газа - 266 Па; состав газа - 25%(N₂) + 75% (H₂) (диссоциированный аммиак); температура - 500°C.

Твердое покрытие наносилось плазмой с дуговым разрядом катода (САРДР). Параметры нанесения покрытия: давление газа (азот) - 3 x 10⁻¹ Па; ток в дуге - 100 А; напряжение смещения - 200 В; фокусирующий ток в катушке - 0,2 А; температура при нанесении покрытия - 500°C.

Поверхностный слой очищался до имплантации специальной небольшой по времени обработкой в тлеющем разряде для улучшения адгезии ФОП - покрытия с подложкой. До нанесения ФОП - покрытия каждый из образцов был имплантирован ионами одного из шестнадцати различных элементов с помощью высокоэнергетического ионного имплантатора с энергией приблизительно в 60 кэВ при комнатной температуре. Типично используемые дозы

составляли 4 x 10¹⁷ ионов на см². До ионной имплантации исследуемых элементов было проведено травление поверхности ионами аргона. Чтобы снизить загрязнение поверхности использовалась охлаждаемая ловушка для поддержания низкого фонового давления в ~ 2x10⁻⁶ мм.рт.ст. Основой инструментального материала была быстрорежущая сталь Р6М5.

Концентрация атомов имплантируемых элементов в поверхностном слое образцов определялась с помощью рентгеновского микроанализа на сканирующем электронном микроскопе JSM - U3, оборудованном спектрометром на двух кристаллах для рассеивания волн. Эти концентрации составили около 1,0 - 1,5 атомных %.

Химический состав вторичных фаз, появляющихся на поверхности инструмента при резании, исследовался с помощью ВИМС - спектрометрии вторичной массы ионов. Это исследование было выполнено на электронном спектрометре ESCALAB MK2 (VG), оборудованном ионным анализатором SQ 300 квадрупольного типа и сканирующим ионным распылителем AG-61, который позволяет фокусировать поток первичных ионов аргона с энергией до 5 кэВ на участке диаметром до 0,5 мкм на поверхности образца. Скорость ионного травления была порядка 0,2 монослоя в мин, анализ выполнялся в статическом режиме. Исследовался средний химический состав зоны износа покрытия и образовавшихся пленок.

Для ионной модификации на поверхности использовались шестнадцать химических элементов, заранее выбранных для этой работы. Эти элементы можно сгруппировать следующим образом:

1. Элементы (газы) с высокой способностью к окислению, создающие устойчивые динамические защитные поверхностные пленки при трении, например - O, N, J и Cl;
2. Неметаллы (B, C, Si), способные создавать соединения с высокими техническими свойствами при взаимодействии с основными материалами и окружающими элементами;
3. Металлы, включая:
 - 3.1 Металлы с низкой точкой плавления (в частности, In, Mg, Sn, Ga), используемые как смазки или антифрикционные материалы;
 - 3.2 Родственные металлы с шестигульной решеткой и антифрикционными свойствами;
 - 3.3 Металлы (Al, Cr), способные образовывать окисеподобные пленки, устойчивые при резании, с хорошими антифрикционными свойствами и низким коэффициентом теплопроводности;
 - 3.4 Металлы с низким коэффициентом трения при контактировании с обрабатываемыми материалами (сталью, никелевыми и титановыми сплавами), например, Ag и Cu.

Выбирая металлические материалы, мы принимали во внимание известные износостойкость с трибологической совместимости контактирующих элементов. Для ионной имплантации были выбраны химические элементы с

наименьшей совместимостью в трибопарах с железом, никелем и титаном, т.е. с металлами, входящими в состав обрабатываемых материалов: низколегированных, теплоустойчивых и некоррозийных сталей, а также титановых и никелевых сплавов, широко используемых в деталях машин. Более того, азотированная поверхность инструмента подвергалась ионному смешиванию с четырьмя типами антифрикционных сплавов, часто используемых для улучшения условий трения скольжения: сплава на основе цинка Zn + Al(9%) + Cu(2%); сплава на основе Cu + Pb(12%) + Sn(8%); сплава на основе свинца Pb + Sn(1%) + Cu(3%) и сплава на основе алюминия Al + Sn(20%) + Cu(1%) + Si(0,5%).

Износ четырехгранных быстросменных пластин из быстрорежущей стали с многослойными покрытиями исследовался при точении стали 40X со скоростью резания - 270 м/мин, глубина резания - 0,5 мм, подача - 0,11 мм/об. Резание проводилось как с охлаждающей жидкостью, так и без нее. Влияние ионной модификации поверхности на износостойкость резцов было оценено путем сравнения периодов стойкости инструментов с предложенными многослойными покрытиями инструментов с поверхностными технологическим покрытиями без дополнительной ионной модификации. Коэффициент износостойкости инструмента был определен как отношение времени, необходимого для резания до соответствующего технического условиям значения износа инструмента с многослойным покрытием, к времени, необходимого для резания инструментом с поверхностным технологическим покрытием (Ti,Cr)N + ионное азотирование). Не менее 8 испытаний по резанию были проведены для каждого вида поверхностной модификации (исследовались по две пластины). Разброс измерений износостойкости составил 10%.

Коэффициенты трения были определены с помощью адгезиомера особой конструкции [2]. На этом адгезиомере вращающийся индентор с исследуемыми покрытиями был помещен между двумя полированными образцами, изготовленными из обрабатываемого материала (сталь 40X). Чтобы смоделировать условия трения, аналогичные процессу резания, образцы и индентор нагревались электродатным способом в диапазоне температур от 150° до 550°C. Сжимающая образцы сила равнялась 2400 Н, это создавало пластическую деформацию в зоне контакта. Для оценки антифрикционных свойств слоя мы использовали адгезионный компонент коэффициента трения. Этот компонент важен для оценки и прогнозирования интенсивности износа при трении металлов. Он определялся как отношение сопротивления сдвигу τ_{ms} вызываемому адгезионным взаимодействием между материалами инструмента и обрабатываемой деталью, к нормальному напряжению P_{ms} , возникающему на пластическом контакте при температурах испытания (τ_{ms}/P_{ms}).

Как можно видеть, ионная модификация поверхности резца значительно влияет на его износостойкость. Эти результаты не противоречат данным других исследований. По нашему мнению, на повышение износостойкости резца оказывает влияние комплексное сочетание многочисленных взаимосвязанных факторов. Сюда относятся факторы, которые дают возможность:

Износостойкость резцов с модифицированным поверхностным слоем (ионная имплантация)

Группа	Материал	Состав элементов	Коэффициент адгезии к подложке с модификацией	Коэффициент износостойкости при резании	
				без СОЖ	с СОЖ
Поверхности, модифицированные ионной имплантацией					
1	Элементы с высокой степенью окисления	O	0,25	0,9	1,25
		N	0,41	2,0	1,83
		I	0,7 - 0,8	3,2	0,7
		Cl	-	1,8	-
2	Неметаллы	B	0,6	1,2	0,65
		C	0,6	1,7	0,83
		Si	-	0,7	0,6
3	Металлы				
A)	Легкоплавкие	In	0,6	2,4	2,1
		Mg	0,25	3,0	0,08
		Sn	0,6	0,8	0,7
		Ga	-	2,0	-
Б)	С шестигульной решеткой	Co	0,5	1,8	0,13
В)	Образующие устойчивые окисы	Al	0,4	0,15	1,3
		Cr	0,6	0,2	1,2
Г)	С низким коэффициентом трения	Cu	0,55	1,0	2,5
		Ag	0,4	3,1	2,7
Поверхности, модифицированные антифрикционными сплавами (ионная имплантация)					
4	Zn - Al - Cu 9 - 1,5 ГОСТ 21437 - 75	Zn + Al(9%) + Cu(2%)	0,44	1,98	-
		Cu + Pb(11%) + Sn(9%)	0,4	0,95	-
		Pb + Sn(1,5%)	0,35	0,6	-
		Al - Sn - Cu AO20 - 1 ГОСТ 14113 - 69	0,3	0,4	-

Данные таблицы показывают, что имплантация антифрикционных сплавов, что широко используется для улучшения условий трения скольжения [3], позволяет повышать износостойкость резца, не более чем в 2 раза. Такой способ повышения износостойкости резца, снижение сопротивления сдвигу адгезионных связей, появляющихся между инструментом и деталью, по-

видимому, не является самым эффективным для многослойного исследуемого покрытия. Для почти всех исследуемых антифрикционных сплавов адгезия покрытия с модифицированной поверхностью была довольно низкой. Это препятствует их практическому применению по технологическим причинам (из-за возможности отрыва от поверхности инструмента).

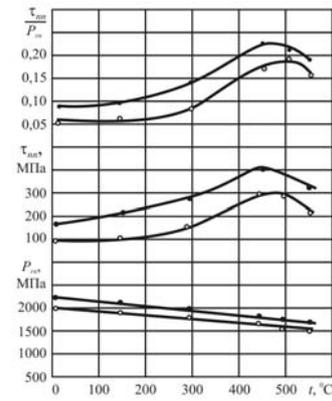
Имплантирование химических элементов позволяет получать лучшие результаты. Такие элементы, как индий, серебро и азот, повышают износостойкость инструмента в 2-3 раза (см. табл.1) при различных условиях резания (с охлаждающей жидкостью и без нее). Полученные результаты можно рассматривать как нормальные. Индий и серебро, наименее взаимодействующие с железом, их можно использовать как смазывающие вещества при обработке металлов. Они способствуют образованию измельченной стружки на резце с таким покрытием. Ионная модификация поверхности резца с другими исследуемыми элементами дает неустойчивый или негативный эффект, т.е. снижение износостойкости инструмента и невозможность обеспечения высокой адгезии между твердым покрытием и основанием.

С нашей точки зрения, наиболее предпочтительным, что касается комплекса свойств, является покрытие с имплантированным слоем индия, что дает возможность повысить износостойкость инструмента максимально, независимо, используется ли он с охлаждающей жидкостью или без нее (табл.). В тоже самое время, адгезия между покрытием и основным слоем, модифицированным индием, также достаточно высока, это подтверждает надежность покрытия в целом.

Исследование зависимости коэффициента трения от температуры для образцов с модифицированной поверхностью показали, что индий (In) улучшает фрикционные свойства быстрорежущей стали (рис.). Действуя как смазочное вещество, In снижает сопротивление сдвигу $\tau_{\text{пл}}$ адгезионных связей, возникших в трибопарах.

Этого, однако, недостаточно для объяснения износостойкости резцов с поверхностью, модифицированной индием, в 2 и более раза. Как показал спектрометрический анализ массы зоны износа, влияние индия более сложное. Кроме индия в массе металла, в зоне износа обнаружено присутствие окиси индия, возникшей в результате разложения как индия, так и нитрида индия при нагревании во время трения.

Следовательно, оптимизируя технологию имплантации и смешивания ионов в дополнительном слое можно увеличить позитивное влияние ионной модификации на износ инструмента. Исследования показали целесообразность сочетания ионной имплантации и ФОП – обработки в пределах технологического цикла одного многоцелевого устройства для нанесения покрытий.



Влияние температуры при испытании на фрикционные свойства режущих инструментов из быстрорежущей стали с модифицированной поверхностью: ● – ионное азотирование Р6М5; ○ – ионное азотирование Р6М5 + имплантация In

Положительное влияние ионной имплантации In на износостойкость инструмента можно объяснить сложными процессами. Действуя как жидкая фаза при температурах резания, индий способствует уменьшению коэффициента трения. Кроме того, когда резец нагревается при трении, образующиеся на поверхности износа кислородосодержащие фазы индия защищают инструмент, препятствуя переходу от нормального к катастрофическому износу. Это позволяет увеличить стадию нормального износа и значительно повысить износостойкость инструмента.

Список использованных источников: 1. Верецака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с. 2. Шустер Л.Ш., Мисранов М.Ш. Прибор для исследования адгезионного взаимодействия. Патент на полезную модель № 34249 от 24.06.2003 г. 3. Шустер Л.Ш., Крюни Н.К., Шолом В.Ю., Мисранов М.Ш. Покрытия и смазка в высокотемпературных подвижных сопряжениях и металлообработке. – М.: Машиностроение, 2008. – 318 с.

Поступила в редакцию 15.06.2012

УДК 621.835

Мовшович А.Я., Ищенко Г.И., Черная Ю.А., Бондарь О.В., Харьков, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ БАЗОВЫХ ПЛИТ УНИВЕРСАЛЬНО-СБОРНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ ДЛЯ СВАРОЧНЫХ РАБОТ И ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ ИХ ОПИРАНИЯ И ЗАКРЕПЛЕНИЯ

Розглянуті питання впливу конструктивно-технологічних параметрів базових плит на їх деформований стан. Встановлені раціональні умови опирання і закріплення базових плит при різних схемах вантаження, що забезпечують мінімальну величину нормальній і тангенціальній напруженні і деформації базових плит.

Rассмотрены вопросы влияния конструктивно-технологических параметров базовых плит на их деформированное состояние. Установлены рациональные условия опирания и закрепления базовых плит при различных схемах нагружения, обеспечивающие минимальную величину нормальных и тангенциальных напряжений и деформаций базовых плит.

The questions of influence of structurally-technological parameters of base flags are considered on their deformed state. The rational terms of leaning and fixing of base flags are set at different charts loadings providing the minimum size of normal and tangential tensions and deformations of base flags.

Состояние вопроса.

Универсально-сборные приспособления для сборочно-сварочных работ (УСПС) являются сравнительно новым и эффективным средством технологического оснащения, позволяющее в двое уменьшить затраты на изготовление приспособлений для сварочного производства.

Базовые плиты для УСПС являются основанием для размещения элементов универсально-сборных приспособлений, и в процессе работы воспринимают все рабочие нагрузки. От их прочности и жесткости зависит качество сборочно-сварочных работ.

В результате анализа (с точки зрения теории упругости базовые плиты представляют собой тонкие пластины со сложной схемой нагружения и опирания) условий эксплуатации УСПС на машиностроительных предприятиях установлено, что нагружение базовых плит осуществляется под действием двух или четырех изгибающих моментов, опирание и закрепление при этом имеет место в 4-х, 6-ти и 9-ти точках.

Методика исследования.

Исследование напряженно-деформированного состояния базовых плит УСПС выполнялось с применением метода конечных элементов (МКЭ). С позиции конструктивной прочности рассматриваемая задача является двухмерной и относится к первой основной задаче теории упругости.

Исходными предпосылками при постановке настоящей задачи являлись следующие материалы:

- материал пластины считался изотропным и однородным;

- связь между компонентами напряжений и деформаций выражалась законам Гука;

- массовыми и инерционными силами пренебрегали.

При расчете изгиба пластин по методу конечных элементов принимались те же гипотезы, что и в классической теории изгиба пластин. Исследуемая область базовой плиты разбивалась на 64 прямоугольных элемента, в каждом из которых определялись средние значения компонентов напряжений и эквивалентное напряжение, вычисленное по гипотезе удельной потенциальной энергии формоизменения (четвертая теория прочности). В узлах элементов определялись перемещения в направлении оси Z и два угла поворота вокруг оси X к Y (рис.1). При этом были исследованы различные варианты конструктивных и технологических параметров базовых плит УСПС, приведенные в табл.1.

Условия закрепления пластины принимались таковыми, что перемещения по оси Z и углы поворота относительно осей X и Y в точках закрепления, считались равными нулю.

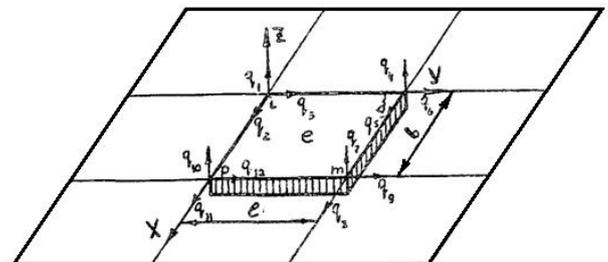


Рисунок 1 – Прямоугольный конечный элемент пластинки при изгибе

Для численной реализации поставленной задачи была разработана программа на алгоритмическом языке ПЛИ в системе ДОС/ЕС. Расчеты проводились на ЭВМ ЕС - 1022.

Результаты исследования.

Полученные результаты машинного счета были систематизированы, проанализированы и представлены в виде эпюр и графиков, характеризующих напряженно-деформированное состояние базовых плит УСПС и влияние на него различных конструктивных и технологических параметров.

Анализ эпюр приведенных напряжений ($\sigma_{\text{пр}}$) показывает, что наиболее нагруженной зоной базовых плит является область приложения изгибающих

моментов. В этой зоне все нормальные (σ_x , σ_y) и тангенциальные (τ_{xy}) компоненты напряжений имеют максимальную величину.

Варьирование конструктивных и технологических параметров базовых плит УСПС в процессе машинного счета показало следующие результаты.

Соотношение сторон плит оказывает существенное влияние на величину действующих напряжений. При одинаковых условиях опирания и схемах нагружения приведенные напряжения из поверхности прямоугольных плит 3 2,1 раза больше соответствующих напряжений квадратных плит.

Изменение условий опирания также оказывает влияние на изменение величины напряжений. Например, в квадратных плитах при нагружении двумя изгибающими моментами величины напряжений при опирании и закреплении в 4-х, 6-ти и 9-ти точках находятся в соотношении 1: 1,7 : 1,8.

Изменение схемы нагружения плит существенно влияет на величину действующих напряжений. Например, при нагружении квадратных плит двумя и четырьмя моментами величины соответствующих напряжений находятся в соотношении 1: 1,6.

Исследования напряженного состояния при различных толщинах плит показало, что приведенные напряжения всех вариантов не только не превосходят допустимое $[\sigma] = 190$ Па, но и значительно меньше его $\sigma_{пр} = 10-70$ Па. Следовательно, напряжения, возникающие на поверхности базовых плит, не является определяющим фактором при выборе их толщины.

На рис.2 показаны эпюры приведенных напряжений квадратных плит при опирании и закреплении в 4-х, 6-ти и 9-ти точках и нагружении четырьмя равными изгибающими моментами.

Исследование деформированного состояния базовых плит показало следующие результаты.

Деформированное состояние плит при одинаковых условиях опирания подобно. Наибольшее значение прогиба имеет в центральных зонах и на контуре плит при закреплении в 4-х точках. Изменение условий опирания оказывает существенное влияние на величину прогибов плит.

При закреплении в 9-ти точках во всех случаях деформации плит имеет незначительную величину.

При закреплении прямоугольных и квадратных плит в 4-х точках и нагружении двумя изгибающими моментами наибольшие прогибы имеют место на контуре плит в области приложения моментов. Отношение наибольшего контурного прогиба к прогибу в центре плиты составляет: для прямоугольных плит 140%, для квадратных – 230%. При закреплении в 6-ти и 9-ти точках эти отношения увеличиваются.

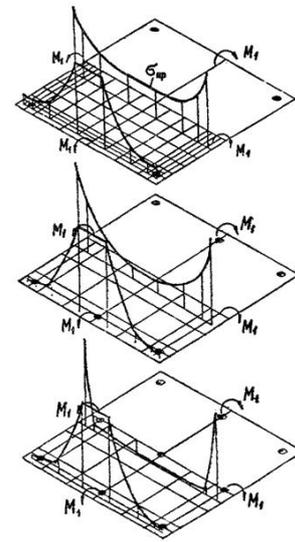


Рисунок 2 – Напряженное состояние квадратной плиты

Изменение схемы нагружения базовых плит оказывает существенное влияние на характер деформированного состояния. Для всех вариантов при закреплении в 6-ти и 9-ти точках наибольшие прогибы имеют место на контуре плит, а не в центральной зоне. При закреплении в 4-х точках наибольший прогиб имеет место в центре плит.

На рис.3 показана картина деформированного состояния квадратной плиты при нагружении четырьмя равными изгибающими моментами.

Установлены соотношения величин прогибов при различных схемах нагружения.

Анализ картин деформированного состояния рассматриваемых вариантов плит позволяет сравнительно просто выбрать оптимальную схему их опирания.

Из всех рассмотренных вариантов видно, что наименьшие прогибы базовые плиты при всех схемах нагружения имеют в случае закрепления их в 9-ти точках.

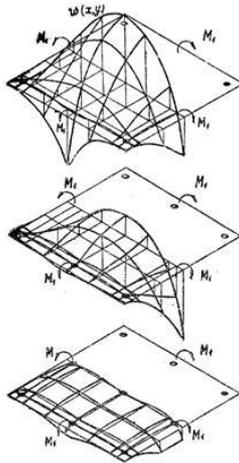


Рисунок 3 – Деформированная поверхность квадратной плиты

Таким образом, по результатам исследования напряженно-деформированного состояния базовых плит универсально-сборных приспособлений для сборочно-сварочных работ по методу конечных элементов сделаны следующие основные выводы:

1. Максимальные значения компонент нормальных к тангенциальных напряжений наблюдаются у боковых кромок плит.
2. Приведенные напряжения во всех рассмотренных случаях значительно меньше допускаемых.
3. Оптимальным с точки зрения напряженно-деформированного состояния является закрепление базовых плит в 9-ти точках.

Список использованных источников: 1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике, М., 1975 2. Постонов В.А., Хархурин И.Я. Метод конечных элементов в расчетах судовых конструкций, Л., 1974 3. Мовшович А.Я., Федосеева М.Е., Азарков В.В. Унификация и стандартизация технологической оснастки - важнейшее условие ускоренной технологической подготовки производства, ХТ, УТУ «ХПИ», 2011, № 40, с. 13-18.

Поступила в редакцию 10.04.2012

УДК 621.9

Е.В. Набока, канд. техн. наук, Харьков, Украина

АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

У статті розглядається діюча процедура опису й аналізу результатів контролю якості продукції та результативності системи якості. Описано процеси управління, спрямовані на поліпшення якості продукції та підвищення результативності системи якості.

В статті розглядається діюча процедура описання й аналізу результатів контролю якості продукції та результативності системи якості. Описано процеси управління, направлені на поліпшення якості продукції та підвищення результативності системи якості.

The article discusses current arrangements for the description and analysis of quality control and effectiveness of the quality system. We describe the management processes to improve product quality and increase the effectiveness of the quality system.

Цель работы является повышение эффективности производства продукции машиностроения с учетом оценки результативности функционирования системы качества изготовления деталей.

Рассмотрена действующая процедура описания и анализа результатов контроля качества продукции и результативности системы качества. Установлена периодичность проведения такого анализа. Описаны процессы управления, направленные на улучшение качества продукции и повышения результативности системы качества.

Входными данными для проведения анализа результативности системы качества являются: результаты внутренних аудитов системы качества и аудитов, проводимых органом по сертификации, данные о проверках эффективности отдельных процессов системы качества, сведения о реализации мер корректирующего и предупреждающего воздействия и оценке их результативности, сведения о факторах, которые могут потребовать внесения изменений в систему качества, результаты реализации решений, принятых по выводам предшествующего анализа, а также предложения и рекомендации по совершенствованию системы качества.

Выходными данными анализа являются решения по действиям с несоответствующей продукцией, а также решения, направленные на повышение результативности функционирования системы качества и ее процессов, улучшение качества продукции и обеспечение деятельности предприятия соответствующими ресурсами. Типовая структурно-логическая схема процесса "Анализ результативности функционирования системы качества" приведена на рисунке 1.

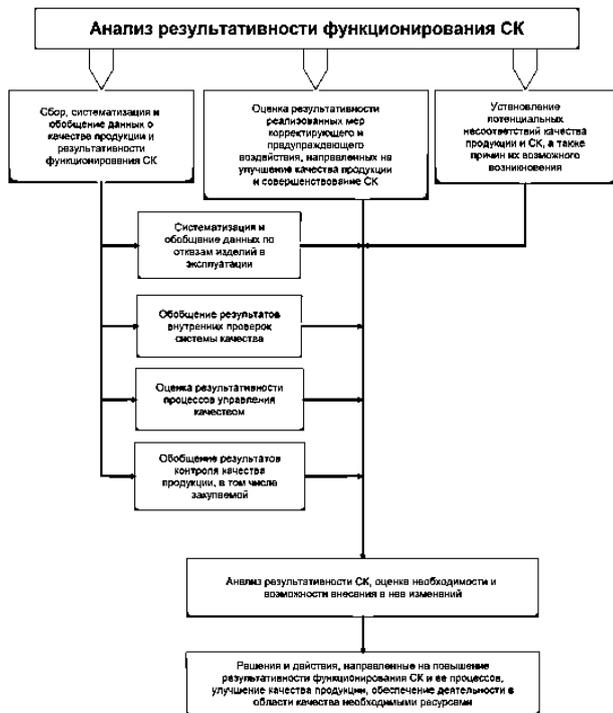


Рисунок 1 – Анализ результативности функционирования системы качества

В документации системы качества должны быть изложены процедуры описания материалов, полуфабрикатов, комплектующих изделий и элементов конструкции продукции с несоответствиями, предоставлены формы документов для регистрации решений по этой продукции. Также необходимо иметь перечень видов несоответствий и принятие решений.

Система качества машиностроительного производства как часть общей системы управления предприятием, может эффективно работать и приносить наибольшую выгоду, если ее поддерживают современные технологии, разработанные и внедренные на предприятии в соответствии со спецификой его запросов и уровня развития.

Построение системы качества мы осуществляем по стандарту ISO 9001:2008 при помощи имитационного моделирования. Основными требованиями данного стандарта есть выполнение процессов представленных на рисунке 2:



Рисунок 2 – Процессы стандарта ISO 9001:2008

Для разработки системы качества изготовления деталей необходимо следовать только процессам жизненного цикла.

При разработке системы качества необходимо использовать рекомендации стандарта ISO 9004:2000.

На основе этого можно построить предположительную схему системы качества изготовления деталей машиностроительного производства и связать ее с типовой схемой процессного подхода, тем самым обеспечив непрерывность процессов (рис. 3).

Построить правильную взаимосвязь всех процессов предприятия в данной ситуации затруднительно, но при помощи матрицы процессов можно показать основные взаимосвязи процессов предприятия.

Этот вид описания предусматривает построение матрицы процессов управления качеством и матрицы распределения обязанностей, полномочий и ответственности за функционирование системы качества между управляющим персоналом производства.



Рисунок 3 – Схема системы качества изготовления деталей инструментального производства

С помощью матрицы процессов управления качеством можно установить их взаимосвязи и определить необходимые входные и выходные потоки информации.

Список использованных источников: 1. Басовский Л.Е., Протасьев В.В. / Управление качеством: Учебник. - М: ИНФРАМ, 2001. - 212 с. 2. Туркин В.Г., Герасимов Б.И. и др. / Качество машиностроительной продукции / Под науч. ред. Б.И. Герасимова. - Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. - 104с. 3. Управление качеством. Учебник / С. Д. Ильенкова Н. Д. Ильенкова и др. / Под ред. доктора экономических наук, профессора Ильенковой С. Д. - М.: ЮНИТИ. 4. Бастрыкин Д.В., Евсейчев и др. / Управление качеством на промышленном предприятии/ Под науч. ред. д-ра экон. наук. проф. Б.И. Герасимова. - М.: «Издательство Машинностроения-1», 2006. - 204 с.

Поступила в редакцию 11.05.2012

Наименование процессов	Организация управления качеством	Управление ресурсами	Управление производством продукции	Контроль качества продукции и результативности функционирования СК	
	Входные данные				
Организация управления качеством	-	Политика в области качества. Обеспеченность ресурсами	Политика в области качества. Документы СК.	Политика в области качества. Мероприятия по улучшению качества. Документы СК.	
Управление ресурсами	Выходные данные	Сведения о наличии и качестве ресурсов	Подготовленный персонал. Производственная инфраструктура.	Подготовленный персонал. Производственная инфраструктура.	
Управление производством продукции		Требования заказчика. Нормативные требования.	Заявки подразделений на персонал. Требования к инфраструктуре.	-	Продукция. Документы на продукцию.
Контроль качества продукции и результативности функционирования СК		Результаты контроля качества продукции и результативности СК.	Заявки на обеспечение персоналом, осуществляющим контроль.	Заключение о качестве продукции.	-

Матрица процессов управления качеством устанавливает состав процессов, их взаимосвязь и определяет необходимые входные и выходные потоки.

Достоинство указанного вида описания – наглядное и компактное отображение процессов управления качеством и их взаимосвязи.

Пример матрицы процессов управления качеством приведен в таблице 1.

Результаты. В результате проведенной работы представлена действующая процедура рассмотрения и анализа результатов контроля качества продукции и результативности системы качества. Установлена периодичность проведения такого анализа. Описаны процессы управления, направленные на улучшение качества продукции и повышения результативности системы качества.

А.О. Огородник, В.Л. Хавин, канд. техн. наук, Харьков, Украина

МЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКЕ

Проведено порівняльний аналіз двох підходів до моделювання пластичного стану матеріалу при обробці різанням: нейро-мережовий та напівемпіричний. Особливістю моделей є необхідність опису стану металу у широкому діапазоні пластичних деформацій, швидкостей деформацій ($1 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$) та температур (20-1000 °C). Для реалізації моделі на базі нейронної мережі було використано перцептрон з одним прихованим шаром. Напівемпіричну модель було реалізовано за допомогою рівняння Джонсона-Кука. Були створені визначальні співвідношення на базі експериментальної сім'ї кривих деформування сталі 45 для проведення порівняльної характеристики ефективності моделей.

Проведен сравнительный анализ двух подходов к моделированию пластического состояния материала при обработке резанием: нейро-сетевой и полумпирический. Особенностью моделей является необходимость описания состояния металлов в широком диапазоне пластических деформаций, скоростей деформаций ($1 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$) и температур (20-1000 °C). Для реализации новой модели на базе нейронной сети был использован перцептрон с одним скрытым слоем. Полумпирическая модель была реализована с помощью уравнения Джонсона-Кука. Были созданы определяющие соотношения на базе экспериментального семейства кривых деформирования стали 45 для проведения сравнительной характеристики эффективности моделей.

A comparative analysis of two approaches to material flow stress state modeling for machining was carried out: neural network and semi-empirical. The main feature of these models is necessity to describe metal state in wide range of plastic strain, strain rate ($1 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$) and temperature (20-1000 °C). For model implementation based on the neural network the perceptron with one hidden layer has been used. Semi-empirical model has been realized with Johnson-Cook equation. The constitutive equations based on the experimental family of strain curves for AISI 45 were generated for the benchmark analysis of the models.

Введение. Имитационное моделирование процесса формовки и механической обработки металла является актуальной задачей, корректное решение которой позволяет добиться снижения стоимости и времени экспериментальных исследований. Методы механики сплошной среды и компьютерной механики реализованные в форме метода конечных элементов (МКЭ), широко применяются при прогнозировании механических параметров технологических операций механообработки. Эти методы в качестве составной части используют определяющие модели (constitutive models) обрабатываемого материала для имитации реальных условий деформирования материала при механообработке.

Определяющая модель (определяющее соотношение) – это модель, описывающая пластическое поведение материала через функциональную зависимость напряжений пластического течения (текущего предела текучести)

Так, в ряде публикаций последнего десятилетия [7-9] для описания свойств металлов и сплавов успешно применяются НС. В работах [10, 11] рассматриваются пути совершенствования нейросетевых моделей материала путем совершенствования способа подготовки данных, а так же варьированием внутренней структуры нейронных сетей.

Для более адекватного описания процесса пластического деформирования в широком диапазоне скоростей деформаций и температур свойственных процессу лезвийной обработки в настоящей работе предложена нейросетевая модель (НС-модель), обеспечивающая более точное описание состояния материала, чем известные классические модели.

Цель работы – разработка определяющего соотношения для материала (сталь 45) с применением НС в широком диапазоне скоростей деформаций и температур.

В работе были решены следующие задачи:

1. Выбор эффективной НС. Подбор наиболее подходящего метода обучения сети и оптимальной архитектуры.
2. Подготовка НС с помощью обучающего набора экспериментальных данных.
3. Сравнение результатов аппроксимации экспериментальных данных, полученных с помощью НС-модели, с результатами, полученными по модели Джонсона-Кука.

Особенности НС-модели. Нейронные сети несколько лет назад были использованы при моделировании металлообработки как альтернатива эмпирическим и полумпирическим математическим моделям, описывающим свойства материала. Подход получил распространение, в основном, благодаря способности моделей на основе нейронов «обучаться» существенно нелинейным связям между входными и выходными параметрами системы. Неотъемлемыми свойствами НС при моделировании пластического поведения материала по сравнению с классическими подходами являются: способность к адаптации, распределенная память, способность к обобщению и строго параллельная структура. Благодаря этим свойствам НС мало чувствительна к шумам (помехам) и обладает большой скоростью по обработке данных, что позволяет эффективно применять модели на основе НС в компьютерной механике в сочетании с методом конечных элементов (МКЭ) [12].

Архитектура нейронной сети. На рис. 1 показана общая структура выбранной нейронной сети. В процессах высокоскоростного пластического деформирования (таких как процесс резания) напряжение пластического течения материала зависит от трех параметров: деформации, скорость деформации и температуры. В используемой нейросетевой модели входной слой соответствующий этим трем параметрам (3 нейрона), а выходной слой представлен одним параметром (нейроном) – текущим пределом текучести. Используемая в работе сеть – перцептрон с последовательными связями и одним

$\bar{\sigma}_\gamma$ от эквивалентных деформаций $\bar{\epsilon}$, скоростей пластических деформаций $\dot{\bar{\epsilon}}$ и температуры T . Общий вид определяющего соотношения может быть представлен зависимостью:

$$\sigma_\gamma = \sigma_\gamma(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T) \tag{1}$$

Определяющие соотношения создаются на основе обработки кривых деформирования, полученных путем испытаний на одноосное растяжение (сжатие) или сдвиг.

Анализ литературы и постановка задачи. Для моделирования пластического поведения материала используются эмпирические и полумпирические соотношения.

Все известные модели основаны на ряде допущений, вызванных сложностью функциональных связей, описывающих поведение материала при широком диапазоне деформаций, скорости деформаций и температур. Успех той или иной модели, в частности, зависит от того, насколько эффективно она отображает внутренние связи рассматриваемого явления. Наибольшее распространение получили эмпирические, а в последнее время – и полумпирические зависимости. Среди них: уравнение Джонсона-Кука (Johnson-Cook) [1], уравнение Зерилли-Армстронга (Zerilli-Armstrong) [2] и уравнение Оксли (Oxley) [3]. Благодаря своей простоте (небольшое количество констант) и способности достаточно хорошо описать качественный вид кривых деформирования в широком диапазоне температур и скоростей деформации эти уравнения получили распространение в практических расчетах по имитационному моделированию процессов лезвийной обработки металлов [4].

Такие модели способны показать картину поведения материала, но не способны достаточно хорошо отобразить все многообразие его поведения, включающее существенную качественную неоднородность кривых деформирования в широком диапазоне скоростей деформаций и температур, характерных для процессов лезвийной обработки металла ($\bar{\epsilon} = 0,002-5$; $\dot{\bar{\epsilon}} = 1-100000 \text{ c}^{-1}$; $T = 20-1000 \text{ }^\circ\text{C}$) [5]. При этом известно, что влияние скорости деформации и температуры на пластическое поведение обрабатываемого материала не поддается корректному аналитическому описанию для данного технологического процесса. Это подтверждает и тот факт, что при сравнении с экспериментальными данными, в частности с экспериментальными значениями силы резания, для результатов прогнозирования наблюдается значительная погрешность.

В последние годы широкое распространение получило новое направление в области создания моделей, прогнозирующих свойства материалов на основе искусственных нейронных сетей (НС, Artificial neural network, ANN), которые зарекомендовали себя как эффективный метод аппроксимации сложных нелинейных и неявных зависимостей [5, 6].

скрытым слоем – оптимальный вариант для аппроксимации непрерывных функций [7, 8]. Скрытый слой содержит 5 нейронов.

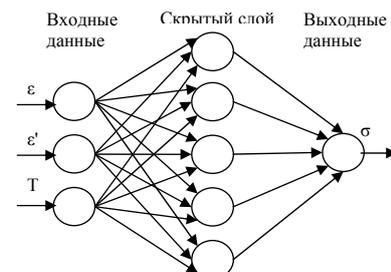


Рисунок 1 – Архитектура нейронной сети

Структура экспериментальных данных. Экспериментальные данные по стали 45 (AISI 1045) для обучения НС задавались в табличной форме из базы данных материалов программного комплекса Deform v.10. Данные представлены для следующих деформаций [0,002, 0,05, 0,1, 0,4, 0,7, 1, 2, 5], скоростей деформаций [1, 100, 1000, 10000, 100000] c^{-1} , температур [20..1000] $^\circ\text{C}$ с шагом в $100 \text{ }^\circ\text{C}$.

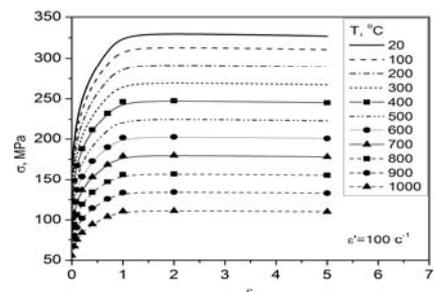


Рисунок 2 – Семейство кривых течения стали 45 при скорости деформаций 100 c^{-1}
 На рис. 2 показан пример семейства кривых деформирования построенных по используемым табличным экспериментальным данным при скорости деформаций 100 c^{-1} для всего рассматриваемого диапазона температур. По

оси абсцисс – истинные деформации ε , по оси ординат – напряжения пластического течения σ_y .

Подготовка данных и обучение НС. Практика показала, что для достижения лучших результатов работы сети исходные данные перед обучением необходимо нормализовать. Т.е. в идеале все данные, которые используются для обучения нейронной сети необходимо привести к диапазону от 0 до 1. Для нормализации был выбран простейший алгоритм, а именно деление всех значений обучающей выборки на максимальное значение соответствующего диапазона.

Методом проб для обучения НС был выбран вариант входного вектора вида: $(\varepsilon, \ln(\dot{\varepsilon}), T)$. В предыдущей работе [13] было установлено, что именно такой вариант подготовки данных является наиболее эффективным. Это можно объяснить тем, что для скорости деформаций логарифмическая функция создает равные интервалы для всей обучающей выборки по данному параметру (упорядочивает «сетку» данных).

В качестве критерия завершения процесса обучения в данной работе был использован критерий по количеству обучающих итераций. Опытным путем установлено, что до отметки 10^5 итераций погрешность при обучении уменьшается. После чего значительных изменений в качестве процесса обучения (уменьшения погрешности) не происходит.

В процессе подготовки данных было сформировано 495 набора данных. Из которых 486 (98%) было использовано для обучения, а 9 (2%) – для проверки качества работы НС. В качестве проверочного набора была выбрана кривая $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ при $\dot{\varepsilon} = 10^3 \text{ c}^{-1}$ и $T = 500 \text{ }^\circ\text{C}$. При обучении НС-модели данная кривая была исключена.

Определяющее соотношение Джонсона-Кука. В настоящее время модель (уравнение) Джонсона-Кука чаще других применяется при имитационном моделировании процессов лезвийной обработки для представления зависимости напряжения пластического течения от деформаций, скорости деформаций и температуры. Однако известно, что корреляция данного уравнения с экспериментальными данными не удовлетворительна, в частности для широких диапазонов скоростей деформаций и температур. Уравнение Джонсона-Кука имеет следующий вид:

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n] \cdot \left[1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right] \cdot (1 - T_h^m) \quad (2)$$

$$T_h = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}, \quad (3)$$

261

где σ – напряжение пластического течения, ε – деформации, $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформаций, T – температура, A, B, n, C, m – коэффициенты, которые подбираются путем минимизации среднеквадратичной погрешности между экспериментальными данными и численными значениями, полученными по уравнению Джонсона-Кука (табл. 1), $\dot{\varepsilon}_0$ – эталонная скорость пластических деформаций (принято 1 c^{-1}), T_{room} – комнатная температура ($20 \text{ }^\circ\text{C}$), T_{melt} – температура плавления исследуемого металла (для стали 45 принята $1460 \text{ }^\circ\text{C}$).

Таблица 1 – Коэффициенты для уравнения Джонсона-Кука для стали 45

Наименование коэффициента	A (MPa)	B (MPa)	n	C	m
Числовые значения	81,479	221,675	1,05	0,294	0,158

При подборе коэффициентов для уравнения Джонсона-Кука использовался тот же набор экспериментальных данных, что и при обучении НС-модели.

Проверка качества моделей. Для оценки работоспособности и качества моделей использовались статистические критерии [7-9, 12]. Эффективность работы сети и уравнения Джонсона-Кука определялась и представлялась с помощью средней относительной погрешности (average absolute relative error, AARE) и коэффициента корреляции (R):

$$AARE(\%) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{E_i - P_i}{E_i} \right| \times 100, \quad (4)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}}, \quad (5)$$

где E – данные из экспериментального набора, P – данные полученные с помощью нейронной сети, \bar{E} и \bar{P} – средние значения E и P соответственно, N – общее число данных использованных при оценке погрешности.

В табл. 2 показана сравнительная эффективность работы двух рассматриваемых моделей материала при одинаковых исходных экспериментальных данных, используемых для формирования моделей. Как видно для обучающего набора экспериментальных данных разница в средней относительной погрешности существенна. При этом стоит отметить, что лучшие показатели дает именно НС-модель. Так, полученные результаты по НС-модели показали хорошее качество обучения – средние относительные погрешности для обу-

262

чающего (2,474%) и проверочного (1,9%) набора данных. Для проверочного набора модель на основе нейронной сети показала еще более высокую точность по сравнению с моделью Джонсона-Кука.

Таблица 2 – Сравнение погрешностей для определяющих соотношений

№	Наименование модели	Обучающий набор		Проверочный набор	
		ARRE, %	R	ARRE, %	R
1	НС-модель	2,474	0,999	1,9	0,997
2	Модель Джонсона-Кука	5,246	0,990	5,219	0,946

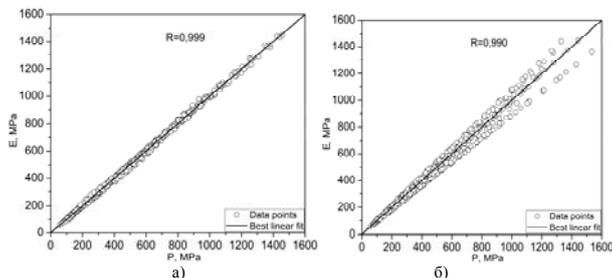


Рисунок 3 – Корреляция между экспериментальными значениями (E) и расчетными значениями напряжений (P) для: а) НС, б) модели Джонсона-Кука.

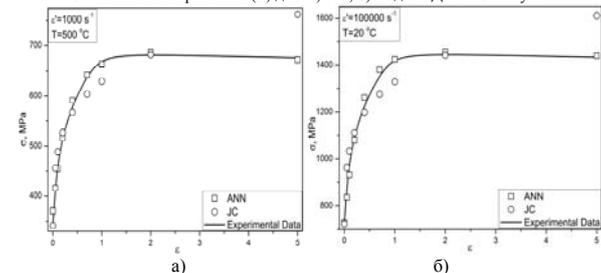


Рисунок 4 – Качество аппроксимации кривых деформирования стали 45 с помощью НС и моделью Джонсона-Кука: а) при скорости деформаций 10^3 c^{-1} и температуре $500 \text{ }^\circ\text{C}$, б) при скорости деформаций 10^3 c^{-1} и температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

По коэффициенту корреляции можно оценить качество аппроксимации экспериментальных данных. Из рис. 3-4 видно, что чем больше значения напряжений и деформаций, тем больше отклонение экспериментальных данных

263

от данных по модели Джонсона-Кука. Например, если в диапазоне малых значений напряжений (до 400 МПа) по модели Джонсона-Кука AARE составляет порядка 4,86 %, то при больших напряжениях (более 1000 МПа) эти значения составляют 5,6 %.

Выводы. В работе предложен основанный на нейронных сетях новый подход к моделированию пластического состояния материала в широком диапазоне скоростей деформаций и температур, соответствующих процессам лезвийной обработки.

Предложенная НС-модель обеспечивает хорошую точность аппроксимации семейства кривых деформирования, как для обучающей выборки данных, так и для проверочной выборки, в то время как широко применяемая модель Джонсона-Кука, сформированная на этом же семействе кривых деформирования, хорошо проявила себя только на отдельных диапазонах параметров (на малых деформациях и скоростях деформаций).

Полученные результаты показали возможность успешного применения НС-модели в имитационных моделях для прогнозирования выходных параметров технологических процессов лезвийной обработки.

Список использованных источников: 1. Johnson G.R Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures/ Johnson G.R., Cook W.H. A // Proceedings of the 7th int. Symp. On Ballistics. -1983. -С. 541- 547. 2. Zerilli F.J., Dislocation-mechanics-based constitutive relation for material dynamics calculations/ Zerilli F.J., Armstrong R.W. //Journal of Applied Physics. -1987. -0. 61. -С. 1816- 1825. 3. Oxley P.L. Mechanics of machining: An analytical approach to assessing machinability. // Ellis Horwood Limited. - 1989. - 242 с. 4. Залого В.А., О выборе уравнения состояния обрабатываемого материала для моделирования процесса резания методом конечных элементов / В.А. Залого, Д.В. Криворучко, С.Н. Хвостик // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. 2006. — №12(96). — с. 101-115. 5. Hashash Y.M.A. Numerical implementation of a neural network based material / Hashash Y.M.A., Jung S., Ghaboussi J. // International journal for numerical methods in engineering, 2004 – 59 – с. 989–1005. 6. Haj-Ali R.M. G.Z. Simulated Micromechanical Models using Artificial Neural Networks / Haj-Ali R.M., Pecknold D.A., etc. // ASCE J. Eng. Mechanics, 2001 – Vol. 127, No. 7 – с. 730-738. 7. Sumantra Mandal Constitutive flow behaviour of austenitic stainless steels under hot deformation: artificial neural network modelling to understand, evaluate and predict / Sumantra Mandal, Sivaprasad P.V., etc. // Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. 2006 – 14 – с. 1053-1070. 8. D'Addona D. Intelligent Material Modelling for Mild Steel Hot Working / D'Addona D., Tei R. // Vimation Journal, Special Issue on Interactive Systems in Healthcare, 2010 – ISSN 1866-4245 – с. 79-83. 9. Reddy N.S. Neural network modelling of flow stress in Ti–6Al–4V alloy with equiaxed and Widmanstatten microstructures. / Reddy N.S., Park C.H., etc. // Materials Science and Technology, 2008 – Volume 24, Number 3 – с. 294-301. 10. Wang B. Improvement of the Prediction Accuracy and Efficiency of Hot Strength of Austenitic Steels with Optimised ANN Training Schemes / Wang B., Kong L.X., etc. // Metals and materials international, 1998 – Volume 4, Number 4 – с. 823-826. 11. Sha, W. The use of artificial neural networks in materials science based research / Sha, W., Edwards, K. L. // Materials and Design, 2007 – Vol.28, No.6 – с. 1747-1752. 12. Sanjeev Sen Development of an Artificial Neural Network Constitutive Model for Aluminum 7075 Alloy / Sanjeev Sen, Janet M. Twomey, Jamal Y. S. Ahmad // IERC Conference – 2002. 13. Хавин В.Л. Модель пластического состояния материала для широкого диапазона температур и скоростей деформаций на основе нейронной сети. / В.Л. Хавин, О.О. Огородник // Вісник НТУ «ХП», - Харків: НТУ «ХП». - 2011. - №52 - 202 с.

Поступила в редакцию 07.05.2012

264

Д.В. Ревенко, В.В. Троценко, канд. техн. наук, П.К. Сопин, канд. техн. наук, Севастополь Украина

УПРАВЛЕНИЕ СЪЕМОМ ПРИПУСКА ПРИ АЛМАЗНО-ЭРОЗИОННО ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОМ ШЛИФОВАНИИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Розглядаються питання побудови високопродуктивних циклів при алмазно-ерозійному електрохімічному шліфуванні виробів.

Рассматриваются вопросы построения высокопроизводительных циклов при алмазно-эрозионном электрохимическом шлифовании изделий.

The problems of high-performance cycles for electrochemical erosion of diamond-polishing products.

Введение

Переход к рыночным отношениям в экономике выдвинул на передний план проблемы связанные с выпуском конкурентоспособной продукции в машиностроении и приборостроении «потребителям необходима продукция, характеристики которой удовлетворяли бы их запросы и ожидания» (ИСО/ПСК 2 9000: 2000), высокий уровень требований к современным машинам и приборам обусловил ряд проблем, связанных с созданием высокопроизводительных технологических процессов, обеспечивающих изготовление деталей с заданными параметрами качества. параметры качества определяют функциональную пригодность деталей (возможность собираемости в сборочные единицы, узлы и агрегаты, обеспечение герметичности стыков и др.), их эксплуатационные характеристики (усталостную прочность, коррозионную стойкость, износостойкость, контактную жесткость и др.). При финишной обработке ряда материалов применяются комбинированные методы шлифования, при которых сьем материала, осуществляется за счет комбинации процессов резания анодного растворения и эрозионного удаления материала.

На основании вышеизложенного целью данной статьи является разработка методики расчета циклов управление съемом припуска при алмазно-эрозионно электро-химическом шлифовании прецизионных поверхностей.

Основная часть

При исследовании операции алмазно- эрозионно электрохимического шлифования (АЭХШ) получена математическая модель [1,2] (таблица 1), которая позволяет решить задачу рационального управления процессом шлифования, она вскрывает функциональные связи показателей качества процесса и производительности обработки с соответствующими управляющими воздействиями, что позволяет для определенных условий обработки найти алгоритмы съема припуска, при реализации которых производительность обработки будет максимальной. Адекватность зависимости, представленных

в таблице, подтверждена экспериментальными исследованиями, выполненными в [1,2], что позволяет использовать их для управления процессом АЭХШ по заданной программе изменения съема припуска за цикл обработки одного изделия. Примеры таких циклов показаны на рисунке 1 для АЭХШ и абразивного шлифования пуансонов вырубных штампов из твердого сплава алмазными кругами зернистостью $Z_p=250$ мкм, $Z_p=125$ мкм на связке М1. Шероховатость поверхности пуансона не должна превышать $H=0,8 \cdot 10^{-5}$ м.

Предложенная динамическая теоретико-вероятностная математическая модель позволяет решить задачу рационального управления. Она вскрывает функциональные связи показателей качества процесса и производительности обработки с соответствующими управляющими воздействиями, что позволяет для определенных условий обработки найти алгоритмы съема припуска, при реализации которых производительность обработки будет максимальной.

Выполненные исследования показывают, что основным возмущающим воздействием при АЭХШ прецизионных поверхностей является износ инструмента S_R , что дает возможность на основании его оценки сделать заключение о выборе принципа функционирования автоматической системы при ее разработке.

Анализ циклов, изображенных на рисунке 1 доказывает преимущества процесса АЭХШ перед абразивным шлифованием. Так, для удаления припуска $\Pi=4 \cdot 10^{-5}$ м кругом зернистостью 125 мкм при АЭХШ необходимо осуществить четыре прохода, для съема этого же припуска при абразивном шлифовании количество проходов увеличивается в 2 раза, во столько же раз падает производительность.

Скорость съема материала увеличивается и достигает максимума при таких значениях зернистости инструмента, при которых технологические ограничения позволяют зерну внедриться на максимальную фактическую глубину в материал при минимальном зазоре между связкой круга и заготовкой ($\delta \rightarrow 0$; $t_0 \sim 1/3 Z_0$). При дальнейшем изменении зернистости производительность АЭХШ падает. Это связано с уменьшением доли механического съема.

Апробация предложенных циклов была выполнена при шлифовании изделий из твердого сплава Т15К6 на станке модели 3Е711ВФ2-1 на заводе МЕМЗ города Мелитополя и заводе "Залив" города Керчи.

Для осуществления автоматизации процесса АЭХШ станок был модернизирован и оснащен комплексом контрольно-измерительной аппаратуры (рисунк 2).

Таблица 1 – Математическая модель операции

№	Наименование	Вид зависимости математической модели
Уравнение связи перемещений в технологической системе		
1	Подача инструмента	$S_{H_i} = \Delta A_{y_i} + Q_{\Sigma, i-1} + \Delta t_{\phi_i} + S_{R_i}$
Функции оптимизации		
2	Объемная скорость съема материала при комбинированной обработке	$Q_{\Sigma}^v = B \times V_U (Q_{\Sigma X} + Q_{\Sigma P} + Q_{MEK})$
3	Себестоимость съема 1 м ³ припуска	$C_i = R_i \frac{t_{IP, i}}{\Pi_i B L} + \frac{q Q_{\Sigma, i} C_{un}}{\Pi_i B L}$
Ограничения		
4	Слой, в котором распределена шероховатость	$H_i = H_{MEK_i} - (Q_{\Sigma, v, i} - Q_{\Sigma, v, i-1}) \leq H_0 + \Pi_i$
5	Среднее арифметическое отклонение профиля	$R_a = \frac{2}{\pi G v \sum_{i=0}^n (W_m - i Q_{\Sigma}^v)^{0.1}} \leq R_{a, доп}$
6	Глубина дефектного слоя	$h_i = \alpha \xi (q - q_0) \left(\frac{2\delta \sqrt{t_{\phi} D_K}}{V_U} \right) \leq \Pi_i + H_0 + h_0 - H_{i-1}$
Сила резания :		
	-для керамики	$P = 1,18 \times 10^7 \times V_K^{-0,17} \times V_U^{0,198} \times t_{\phi}^{1,18} \times U^{-0,15} \leq P_{доп}$
	-для стали ХВГ	$P = 3,56 \times 10^{10} \times V_U^{0,2} \times t_{\phi}^{1,9} \times U^{-0,14} \leq P_{доп}$
	-для сплава Т15К6	$P = 2,54 \times 10^6 \times V_U^{0,11} \times t_{\phi}^{1,1} \times U^{-0,085} \leq P_{доп}$
Средний износ инструмента:		
	-для керамики	$U=2...8$ В $S_R = 292 \times 10^{-10} \times V_K^{0,24} \times V_U^{0,37} \times t_{\phi}^{0,29} \times U^{-0,36} \times t \leq S_{R, доп}$
	$U=8...36$ В $S_R = 228 \times 10^{-11} \times V_K^{0,106} \times V_U^{0,085} \times t_{\phi}^{0,081} \times U^{0,2} \times t \leq S_{R, доп}$	
	-для сплава Т15К6	$U=2...8$ В $S_R = 6,11 \times 10^{-10} \times V_K^{0,34} \times t_{\phi}^{0,3} \times U^{-0,33} \times t \leq S_{R, доп}$
	$U=8...36$ В $S_R = 2,197 \times 10^{-12} \times V_K^{0,16} \times V_U^{0,13} \times t_{\phi}^{0,034} \times U^{0,38} \times t \leq S_{R, доп}$	
	-для стали ХВГ	$U=2...8$ В $S_R = 1,59 \times 10^{-10} \times V_K^{0,26} \times V_U^{0,35} \times t_{\phi}^{0,3} \times U^{-0,34} \times t \leq S_{R, доп}$
	$U=8...36$ В $S_R = 9,86 \times 10^{-12} \times V_K^{0,18} \times V_U^{0,14} \times t_{\phi}^{0,098} \times U^{0,09} \times t \leq S_{R, доп}$	
9	Максимальное напряжение технологического источника питания	$U \leq U_{те. э. з. е. н}$
10	Максимальная скорость подачи стола	$V_U \leq V_{U, max}$

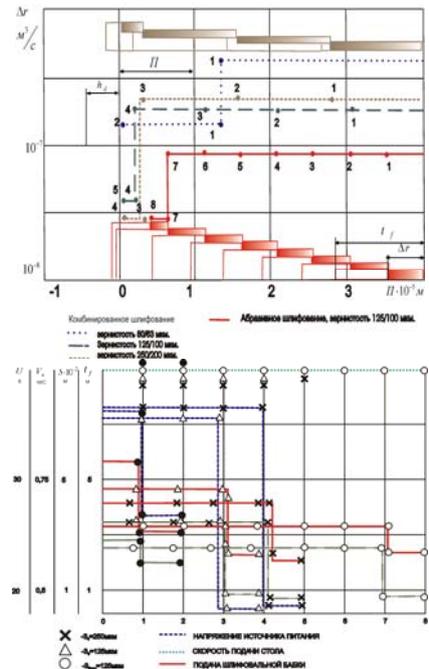


Рисунок 1 – Примеры циклов управления процессом АЭХШ

С целью получения информации о состоянии заготовки на корпусе шлифовальной бабки было установлено измерительное устройство с индивидуальным приводом, позволяющее контролировать толщину заготовки и ее шероховатость. В состав измерительного устройства входит индуктивный датчик модели 248, позволяющий контролировать толщину детали; датчик профилометра-профилографа модели 201 привода вертикального и привод горизонтального.

зонтального перемещения датчика профилометра-профилографа, обеспечивающего относительную скорость перемещения 0,2...1 мм/мин по поверхности заготовки.

Для подачи рабочего напряжения в зону обработки на шлифовальный круг устанавливался токосъемник, подключенный к отрицательному полюсу источника питания. Заготовка подключалась к положительному полюсу.

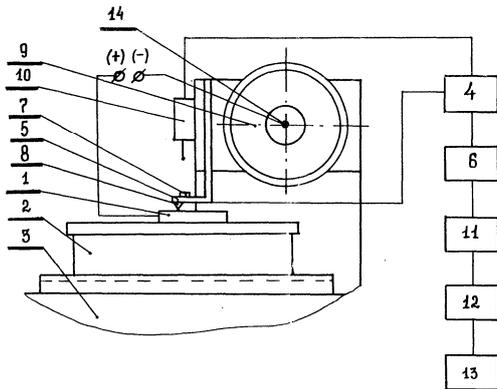


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки.

1 – заготовка; 2 – магнитная плита; 3 – стол станка; 4 – усилитель; 5 – балочка равного сопротивления; 6 – преобразовательное устройство; 7 – тензодатчик; 8 – алмазный наконечник; 9 – алмазный круг; 10 – индуктивный датчик; 11 – УЧПУ; 12 – блок управления станком; 13 – исполнительные устройства станка; 14 – токосъемник.

Работа в автоматическом режиме осуществляется следующим образом:

- заготовка 1 устанавливается на стол шлифовального станка, датчиками 7, 11, измерительного устройства осуществляется контроль толщины заготовки и ее поверхности;

- информация о состоянии заготовки поступает на усилительно- преобразующее устройство 4, 5 и управляющую УЧПУ 6, которая рассчитывает цикл обработки;

- информация от ЭВМ поступает на усилительно-преобразующее устройство станка, на блок управления станком и его исполнительные устройства;

- осуществляется обработка заготовки по рассчитанной программе.

Выводы

Испытание цикла управления производилась на партии заготовок из 20 штук. При обработке заготовок по предложенной методике кругами зернистостью $Z_0=125$ мкм производительность АЭЭХШ увеличилась в 2 раза по сравнению с абразивным шлифованием на основе традиционных алгоритмов, и в 4 раза по сравнению с абразивным шлифованием с постоянной радиальной силой при одинаковом значении шероховатости и точности геометрического размера. При этом себестоимость обработки снижается в 1,5...3 раза. Представленные в таблице 1 математические зависимости отклонений формы шлифовального круга, влияния дисбаланса на выходные показатели процесса, совокупность вышеперечисленных задач представляет собой дальнейшие перспективы развития в данной области.

Список использованных источников: 1. Братан С.М. Повышение эффективности обработки прецизионных деталей приборов на основе автоматического оптимального сьема припуска: Автореф. дис...канд.техн.наук: 05.13.07/СПИ; Севастополь, 1990.-16с. 2. Сопин П.К. Повышение эффективности алмазно-эрозионного электрохимического шлифования прецизионных деталей на основе параметрической оптимизации при автоматическом управлении процессом: Автореф. дис...канд.техн.наук: 05.13.07/СПИ; Севастополь, 1991.-16с.

Поступила в редакцию 12.04.2012

УДК 338.24(075)

Р.Ф. Смоловик, канд. экон. наук, Харьков, Украина

АНАЛИЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СОЦИАЛЬНОГО АСПЕКТА СУЩНОСТИ ПОНЯТИЯ ИННОВАЦИОННОСТИ ПРОЦЕССОВ, ТЕХНОЛОГИЙ

В статье анализируется современное состояние оценки уровня инновационности процессов, технологий; особое внимание уделено их социальной сущности.

У статті аналізується сучасний стан оцінки рівня іновачійності процесів, технологій; особлива увага приділена їх соціальній сутності.

The article analyzes current state assessment of the level of innovation processes and technologies; particular attention is paid to the social entity.

Выход из кризисных ситуаций для многих промышленных предприятий требует решения задач, способствующих совершенствованию процесса управления развитием предприятия. В связи с этим возникает необходимость совершенствования как теоретических, так и практических вопросов управления инновационным развитием предприятий с учетом особенностей современного периода. Поиск более совершенных подходов к процессу управления инновационным развитием в этих условиях требует решения некоторых как теоретических, так и практических задач, поскольку должен базироваться на анализе системы показателей позволяющих: с одной стороны – оценить текущее состояние хозяйственной деятельности предприятия; а с другой – разработать действенный механизм дальнейшего развития предприятия и условия его мониторинга. В связи с этим в своем исследовании мы исходим из анализа некоторых особенностей процесса инновационного развития. Необходимо учитывать тот факт, что, в повседневном понимании система развития рассматривается как движение объектов во времени, а в научном – развитие определяется как совокупность качественных изменений, имеющих определенную целевую направленность. Следовательно, необходимо учитывать, что инновационное развитие всегда ориентировано на конкретный вид производственной деятельности, подлежащей изменению с целью создания различных видов новшеств, как на макро, так и микро уровне. В этих условиях главная функция инновационной системы – приращение ресурсов и деятельности для достижения приоритетной цели – реализации процесса развития

любой системы требует основательного базиса теоретических и практических знаний [1].

На макроуровне социальная сущность инновационности проявляется в изменении динамики структуры трудовых ресурсов: в социально-экономической системе в целом, т.е. перераспределение их из сферы производства в сферу обслуживания. При этом мы исходим из классического положения: чем богаче страна, тем меньше численности трудовых ресурсов занято в сфере производства и тем больше в сфере обслуживания. Следовательно, динамика как абсолютного, так и относительного изменения численности трудовых ресурсов социально-экономической системы, занятых в сфере производства и обслуживания за ряд лет позволит количественно определить ее социальный показатель инновационности. Социальное развитие любой сложной системы определяется как совокупность взаимодействия различных социальных процессов [3].

Особо необходимо учитывать и тот факт, что в современных условиях существует принципиально новый подход к самой сути процесса инновационного развития. Его смысл заключается в том, что такое развитие все более теряет свое технико-экономическое содержание, и все больше рассматривается как социальный системный процесс улучшения качества жизни всей социально-экономической системы (рис. 1).



Рисунок – Процесс формирования качества жизнеспособности

Необходимо отметить, что в теоретических исследованиях процесса инновационного (постиндустриального) развития особо подчеркивается, что

процесс производства носит явно выраженный социальный характер: центром, основой развития становится интеллектуальный потенциал человека, его самовоспитание, самообразование, самореализация.

В связи с этим значительно расширяется сама суть понятия интеллекта как совокупности знаний, культуры, морали, этики, права, которые образуют понятие теории развития самого человека. Инновационность базируется на творческом, интеллектуальном потенциале человека. Ее основная сущность заключается в получении новых знаний и качественного скачкообразного изменения среды обитания человечества. Главным базисом инновационного развития становятся не основные средства производства, а социальный фактор – интеллектуальный потенциал трудовых ресурсов системы, предприятия. В некоторых случаях речь может идти о наличии нескольких единиц творческих личностей, генерирующих идеи, способных создавать новшества, обеспечивать конкурентоспособность и финансовую устойчивость предприятия. Процесс совершенствования управления коллективами научных исследователей – генераторов инновационных идей, как и развитие самой науки в этой области нельзя остановить. Однако в современных условиях он, в первую очередь, проявляется в совершенствовании социальных отношений, в формировании творческой личности исследователя на принципах социально ориентированного маркетинга, с учетом международных тенденций, требований к процессу развития инновационного менеджмента: способность работать в коллективе, умение воспринимать его решения, считаться с мнением других участников принимаемых решений, обладать коммуникабельностью, критическим мышлением, инициативностью, настойчивостью в достижении поставленных целей, признанием за каждой личностью права принимать решение [2].

Непрерывная работа с трудовым коллективом по его развитию предполагает обеспечение постоянного процесса повышения культуры предпринимательской деятельности; воспитание чувства преданности организации, ответственности за качество выполняемой работы; непрерывное повышение квалификации персонала; использование гибкой тарифной политики и гибкого рабочего времени; делегирование функций на низовые иерархические уровни организационной структуры управления; обеспечение работникам гарантий социальной защищенности, постоянное повышение качества жизни каждого сотрудника организации, обеспечение социальных льгот, услуг, вознаграждений и др.

Все изложенное выше позволяет сделать вывод о необходимости обязательного учета социального (человеческого) фактора в процессе анализа уровня, потенциала инновационности организации, предприятия, региона, страны в целом. Необходимо учитывать и определенные условия, возможности для развития инновационной деятельности. К ним можно отнести интеллектуальный потенциал изобретательности и финансовые ресурсы. Однако решающим фактором инновационной стратегии, обеспечивающим успех инновационной деятельности выступает фактор времени – своевременность появления, необходимая для новшества, т.е. абсолютный фактор времени, а «преимущество во времени» по сравнению с конкурентами.

Необходимо, на наш взгляд, учитывать и экологическую составляющую сущности понятия инновационности: охрану окружающей среды, снижение уровня вредных выбросов в атмосферу, околосредное пространство, водные бассейны земли.

К сущности понятия инновационности относятся, на наш взгляд, также и институциональные признаки, поскольку процесс инновационного развития тесно взаимосвязан с системой интеллектуальной собственности, ее правовым обеспечением; с действующим законодательством и политикой государства; регулированием рынка и доступностью капитала. К институциональным факторам, прежде всего, относят наличие организаций, контролирующих стандарты, осуществляющих испытания и сравнение качества товаров, включая их упаковку, которые могут помочь в выборе лучшего названия товара, осуществить его квалифицированное испытание, сертификацию.

Список использованных источников: 1. Гринев Б. В., Гусев В. А. Инноватика. – X., 2004. – 440 с. 2. Borman Diter. Menedzment – Hamburg: Sund W, 1992. – 963 p. 3. Банюрка А. М. и др. Технологическая инновационная деятельность. Менеджерский аспект. – X., 2004. – 304 с.

Поступила в редколлегию 15.06.2012

УДК 621.923

Р.М. Стрельчук, канд. техн. наук, Харьков, Украина,
Ш. К. Джха, канд. техн. наук, Нью-Дели, Индия

ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ НАНОСТРУКТУРНЫХ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

Представлено результаты исследований производительности обработки при разных условиях алмазно-искрового шлифования наноструктурных твердых сплавов. Выявлено оптимальные условия, обеспечивающие наибольшую производительность обработки.

Представлены результаты исследований производительности обработки при различных условиях алмазно-искрового шлифования наноструктурных твердых сплавов. Определены оптимальные условия, обеспечивающие наибольшую производительность обработки.

The results of the research process performance under different conditions of diamond-spark grinding nanostructured hard alloys. The optimum conditions for maximum productivity.

В современной металлообрабатывающей промышленности широко используются твердые сплавы на основе карбида вольфрама WC, которые позволяют реализовывать высокопроизводительную механическую обработку резанием труднообрабатываемых материалов. Повышение качества твердых сплавов в развитых странах решается путем создания новых наноструктурных твердых сплавов.

Как известно, в состав традиционных твердых сплавов входит кобальтовая связка, которая связывает зерна WC и позволяет уплотнить материал при сравнительно низких температурах. Однако кобальтовая связка снижает твердость сплава – параметр, который в значительной мере определяет износостойкость материалов. Обычно материалы WC–Co получают механическим перемешиванием соответствующих порошков с последующим холодным прессованием и спеканием. Наиболее сложным этапом этой технологии является механическое перемешивание ультрадисперсных порошков WC и Co. Степень однородности механического перемешивания не позволяет получать в конечном спеченном продукте зерна размером меньше 300 нм [1].

Кроме того в технологии получения традиционных твердых сплавов используются порошки карбида вольфрама с размером частиц 1–5 мкм, для чего исходный порошок подвергается длительному, интенсивному измельчению в течении 48–96 часов. Вместе с тем, все более широкое применение находят наноразмерные порошки карбида вольфрама. Использование наноразмерных порошков тугоплавких соединений с размером зерна менее доли микрона в ряде случаев дает возможность достичь высоких показателей твердости и прочности твердых сплавов [2, 3]. Поэтому способы получения тугоплавких

соединений из наноразмерных зерен WC преобретают существенное значение для повышения качества и износостойкости твердых сплавов.

По одному из таких способов создан новый сплав на основе наноразмерных зерен монокарбида вольфрама (ВолКар) [4]. Разработанный инструментальный материал показал высокую твердость и износостойкость, сопоставимую с инструментальными материалами на основе кубического нитрида бора. Особенность способа получения сплава «ВолКар» состоит в том, что при изготовлении режущих пластин из наноразмерных зерен монокарбида вольфрама WC отпадает необходимость использования при спекании специальных связующих материалов. Исключается также такая важная и ответственная технологическая операция, как перемешивание смесей порошков. Возможность спекания наноразмерных зерен с помощью электрического тока без связующих добавок значительно сокращает технологический цикл изготовления пластин и препятствует возникновению источников образования трещин и пор. Быстрый подъем температуры в процессе горячего прессования ограничивает рост зерен.

Вследствие специфических физико-механических свойств, прежде всего, высокой твердости, низкой теплопроводности и размера зерен, рассматриваемый инструментальный материал обладает низкой обрабатываемостью, а традиционные методы алмазно-абразивной обработки не обеспечивают качественного шлифования и необходимой производительности. Поэтому выявление рациональных условий шлифования нового инструментального сплава «ВолКар» представляется целесообразным.

Как известно, шлифование твердых сплавов производится с введением дополнительной энергии в зону резания, т.е. при алмазно-искровом шлифовании (АИШ).

В процессе работы использовались наноструктурные твердосплавные пластины «ВолКар», представляющие собой геометрическую фигуру типа диска диаметром 20 мм и толщиной 5 мм. Для проведения экспериментальных исследований пластинам придавалась форма квадрата с размером 14×14 мм.

Исследовалось влияние режимов резания – нормального давления (P_n), скорости резания (V) и характеристик алмазного круга – зернистости (Z), концентрации (K).

Производительность обработки изучалась с применением методики многофакторного планирования экспериментов, позволяющей описать процесс в виде уравнений регрессии, т.е. получить математические модели производительности обработки. При этом необходимо знать область изменения независимых переменных, соответствующую наилучшему значению изучаемой производительности обработки, что дает возможность правильно выбрать интервалы варьирования факторов, т.е. определить наиболее рациональный

диапазон условий практического применения режимов резания и характеристик алмазных кругов.

Коэффициенты полинома (уравнения регрессии) рассчитывались по стандартной программе MS Excel «Многофакторный регрессионный анализ». После расчетов коэффициентов получено следующее уравнение регрессии для производительности обработки (1):

$$y_Q = 486,68 + 92,40x_1 + 54,25x_2 - 73,16x_3 + 80,35x_4 + 17,94x_1x_2 - 14,16x_1x_3 + 13,16x_1x_4 - 37,73x_2x_3 + 23,85x_2x_4 - 59,83x_3x_4 - 28,17x_1^2 - 106,22x_2^2 + 41,33x_3^2 + 66,48x_4^2 \quad (1)$$

После проведения канонических преобразований анализ поверхностей отклика осуществляли с помощью двумерного сечения. Для анализа влияния отдельных факторов на показатель производительности обработки строились однофакторные зависимости.

На рис. 1 показано двумерное сечение поверхности отклика $Q - f(P_n, V)$. Характер расположения линий равного отклика позволяет оценить влияние нормального давления и скорости резания на производительность обработки. Увеличение нормального давления и скорости резания приводит к росту производительности обработки. Причем, повышение нормального давления приводит к более глубокому внедрению алмазных зерен в обрабатываемый материал, т.е. увеличивается толщина среза, а рост скорости резания способствует увеличению числа встреч алмазных зерен с обрабатываемым материалом и лучшей самозатачиваемости кругов. Кривые равного отклика производительности обработки в зависимости от нормального давления и скорости резания позволяют выбирать различные сочетания режимов шлифования, обеспечивающих соответствующую производительность обработки. Например, одинаковая производительность обработки может быть достигнута при шлифовании с режимами $P_n = 1,2$ МПа, $V = 35$ м/с и $P_n = 2,0$ МПа, $V = 15$ м/с. Это подтверждает, что при алмазно-искровом шлифовании количественный фактор оказывает существенное влияние на сьем материала.

При алмазно-искровом шлифовании традиционных твердых сплавов, например ВК6, увеличение скорости резания однозначно приводит к росту производительности обработки. Однако, как видно из однофакторной зависимости (рис. 2) наибольшая производительность обработки при шлифовании твердого сплава из наноразмерных зерен монокристалла вольфрама «ВолКар» получена при скорости резания $V = 25$ м/с. Это связано, очевидно, с более высокой твердостью нового сплава «ВолКар» по сравнению с обычным твердым сплавом ВК6. При увеличении скорости резания свыше $V = 25$ м/с алмазные зерна не успевают внедряться в наноструктурный твердый сплав

«ВолКар» и таким образом, нивелируется эффект увеличения числа встреч алмазных зерен.

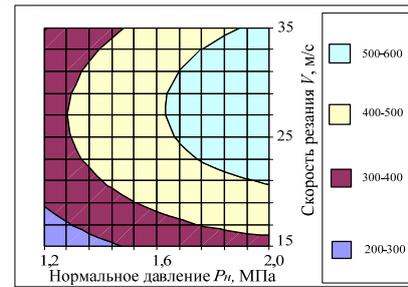


Рисунок 1 – Двумерное сечение поверхности отклика $Q - f(P_n, V)$: $Z = 100/80$; $K = 4$

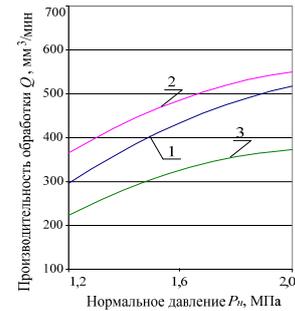


Рисунок 2 – Влияние P_n на Q : $Z = 100/80$, $K = 4$; 1 – $V = 35$ м/с, 2 – $V = 25$ м/с, 3 – $V = 15$ м/с

При обычном алмазном шлифовании сплава «ВолКар» с увеличением нормального давления и скорости резания производительность обработки резко снижается, т. к. не обеспечивается высокая режущая способность кругов, а при алмазно-искровом шлифовании (АИШ) высокая режущая способ-

ность кругов обеспечивается из-за эрозионного воздействия разрядов на связку.

Влияние характеристики алмазных кругов на производительность обработки имеет сложный характер (рис. 3), что связано с несколько иным соотношением производительности и износа кругов, чем при изменении нормального давления и скорости резания. Например, увеличение зернистости от 50/40 мкм до 160/125 мкм для кругов всех концентраций приводит к снижению производительности обработки (рис. 4).

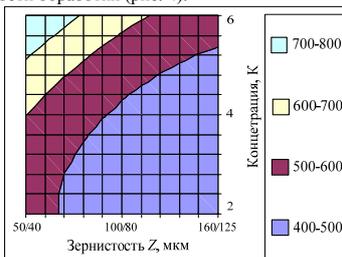


Рис. 3 Двумерные сечения поверхности отклика $Q - f(Z, K)$: $P_n = 1,6$ МПа; $V = 25$ м/с

При этом для кругов с концентрацией 2 увеличение зернистости от 50/40 мкм до 160/125 мкм дает незначительное изменение производительности обработки. Это связано, прежде всего, с постоянным минимальным числом встреч алмазных зерен с обрабатываемым материалом. Для кругов с концентрацией 4 увеличение зернистости от 50/40 мкм до 160/125 мкм приводит к небольшому снижению производительности обработки, т. к. уменьшается число встреч алмазных зерен с обрабатываемым материалом. И, наконец, для кругов с концентрацией 6 наблюдается существенное снижение производительности обработки, что связано со значительным уменьшением числа встреч алмазных зерен с обрабатываемым материалом.

Представляет интерес сравнительная оценка производительности обработки при шлифовании сплава «ВолКар» в различных условиях. Так, например, обычное шлифование алмазным кругом на связке М1-01 (12А2-45° АС6 100/80-4) в условиях $P_n = 1,6$ МПа, $V = 25$ м/с обеспечивает производительность $Q = 274,6$ мм³/мин (за 10 минут работы), а алмазно-искровое шлифование в аналогичных условиях – $Q = 483,5$ мм³/мин. При шлифовании кругом на бакелитовой связке 12А2-45° АС4 100/80 Б1-01-4 в оптимальных условиях производительность $Q = 198,5$ мм³/мин ($P_n = 0,8$ МПа, $V = 30$ м/с). Производительность алмазно-искрового шлифования в оптимальных условиях

($P_n = 2,0$ МПа, $V = 25$ м/с) равна 542,4 мм³/мин при на порядок меньшей удельной себестоимости обработки. Таким образом, алмазно-искровое шлифование сплава «ВолКар» в 1,5 ... 2,0 раза производительнее обычного алмазного шлифования кругами на связке М1-01 и в 2,0 ... 2,5 раз производительнее, чем шлифование кругами на связке Б1-01.

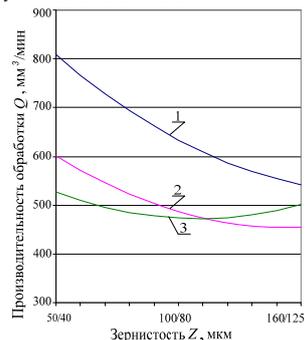


Рисунок 4 – Влияние Z на Q : $P_n = 1,6$ МПа, $V = 25$ м/с; 1 – $K = 6$, 2 – $K = 4$, 3 – $K = 2$

Найденные закономерности изменения производительности обработки позволяют выбирать рациональные режимы и характеристики кругов в различных условиях алмазно-искрового шлифования наноструктурных твердых сплавов. Установлены следующие условия АИШ, обеспечивающие наибольшую производительность процесса: $P_n = 2,0$ Мпа, $V = 25$ м/с, $Z = 50/40$, $K = 6$.

Список использованных источников: 1. Александровский С.В., Донг Вон Ли, Гоппенко В.Г. Новые структуры получения тугоплавких соединений. М.: ГУП «Руда и металлы», 2001. 128 с. 2. Андриевский П.А. Свойства нанокристаллических тугоплавких соединений (Обзор) // Порошковая металлургия. 1993. №11/12. с. 85-91. 3. Аттестация твердых сплавов, полученных с использованием нанокристаллического порошка карбида вольфрама WC / А.С. Курлов, Н.И. Борисенко, В.А. Молдавер и др. // XVII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии: Тез. докл. Казань, 2003. Ч.3. Материалы и нанотехнологии. с. 358. 4. United States Patent № 6,617,271 В1 МКИ С04 В35/36. Tungsten carbide cutting tool materials / Gevorkian E., Kramer M., Kodash V. – Заявл.08.09.2003;Опубл.17.03.2005 – 14р.

Поступила в редакцию 15.03.2012

А.П. Тарасюк, д-р техн. наук, Харьков, Украина

ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОГО СЛОЯ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ПОСЛЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА

Представляється нове рішення актуальної науково-технічної проблеми підвищення якості поверхнього шару волокнистих полімерних композитів після механічної обробки, що дозволило розширити функціональні можливості цих матеріалів за рахунок покращення їх експлуатаційних характеристик. Основним практичним результатом є запропоноване розширення номенклатури виробів з полімерних композитів та заміна ними дорогих металів та сплавів.

Представляется новое решение актуальной научно-технической проблемы повышения качества поверхностного слоя волокнистых полимерных композитов после механической обработки, что позволяет расширить функциональные возможности этих материалов за счет улучшения их эксплуатационных характеристик. Основным практическим результатом является предложенное расширение номенклатуры изделий из полимерных композитов и замена ими дорогих металлов и сплавов.

Presents a new solution of actual scientific-technical problem of quality improvement of surface layer of sliver polymer compounds after mechanical treatment, allowing to extend functional opportunities of these materials for account of their performance characteristics. The development and implementation of effective processes of mechanical treatment of sliver polymer compounds is a basic practical result and it allows to expand the product mix from these materials and replace expensive materials and alloys in most cases.

Анализ применения волокнистых полимерных композитов за последние 20 лет показал существенное расширение сфер их использования [1, 2, 3]. Эти материалы начали вытеснять такие алюминиевые сплавы, как 2090-T83, 2090-T86, 2090-T62, 6013-T6. Замена подлежат и наиболее распространенные сплавы 7055-T77, 7150-T77, 2024 и соответствующие им отечественные аналоги В969пч, ВВАД23, У95оч, У95пч, Д16.

Однако, до сих пор, в высокотехнологических отраслях промышленного производства (авиа- и судостроение) стабильные объемы использования сохраняют высокопрочные стали и титановые сплавы, такие, как 30ХГСН2МА, ВНС-5, 40ХНМА, ВКС-170, ВТ-22, ВТ6 и др.

Одним из существенных факторов, сдерживающих замену этих материалов, является снижение эксплуатационных свойств волокнистых полимерных композитов после их механической обработки из-за дефектов поверхностного слоя, глубина которого может достигать 350÷400 мкм.

Чтобы получить возможность обеспечивать эксплуатационные свойства полимерных композитов на стадии их механической обработки, важной задачей становится установление влияния на эти свойства качества поверхностного слоя.

Ниже приведены результаты исследования влияния качества поверхностного слоя волокнистых полимерных композитов на те их эксплуатационные свойства, которые накладывают наибольшее ограничения на применение этих материалов – прочность, твердость, стойкость к влагопоглощению (пористость), коррозионная стойкость, стойкость к истиранию (износостойкость трущихся поверхностей), диэлектрические свойства (электрическая прочность, объемное и поверхностное электрическое сопротивление, тангенс угла диэлектрических потерь).

Прочность. Исследовали влияние качества поверхностного слоя механически обработанного композита на его статическую и установившуюся прочность. В качестве показателя качества поверхностного слоя использовали глубину дефектного слоя – М. Результаты представлены на рис. 1 - 3.

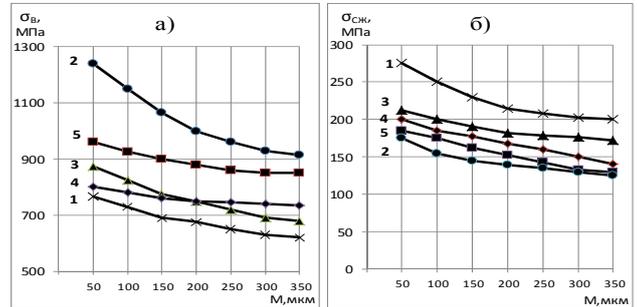


Рисунок 1 – Влияние глубины дефектного слоя композита на прочность при: а) – растяжении, б) – сжатии. Обрабатываемый материал: 1 – стеклопластик, 2 – органоластик, 3 – углепластик, 4 – стеклоорганолластик, 5 – углеорганолластик.

Исследования, проведенные по стандартной методике, показали, что увеличение глубины дефектного слоя композита от 50 до 350 мкм. снижает статическую прочность композитов на растяжение в среднем в 1,3 раза, на сжатие в 1,25 раза, следовательно, для сохранения прочности композита после механической обработки в пределах заявленных разработчиками материала необходимо обеспечивать такие условия резания, при которых глубина дефектного слоя не будет превышать 20-50 мкм.

Пределы прочности на изгиб и сдвиг также имеют устойчивую тенденцию к уменьшению с увеличением глубины дефектного слоя, что появляется наличием концентраторов напряжений в местах разрушения материала по поверхностям раздела структурных компонентов.

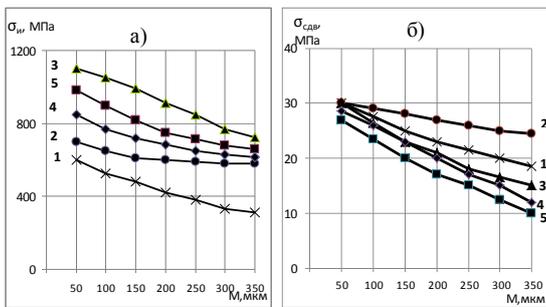


Рисунок 2 – Влияние глубины дефектного слоя композита на прочность при: а) – изгибе, б) – сдвиге. Обрабатываемый материал: 1 – стеклопластик, 2 – органоластик, 3 – углепластик, 4 – стеклоорганолластик, 5 – углеорганолластик.

Испытания композитов на ударный изгиб на маятниковом копре показали 1,5 кратное снижение ударной прочности для всех композитов, подвергающихся испытаниям при увеличении глубины дефектного слоя с 50 до 350 мкм. С увеличением глубины дефектного слоя отмечено уменьшение предела выносливости (рис. 3)

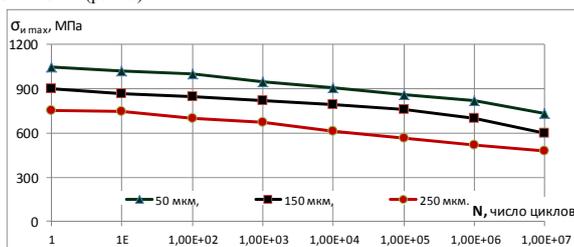


Рисунок 3 – Кривые усталости углепластика с различной глубиной дефектного слоя

Таким образом, можно констатировать, что с увеличением глубины дефектного слоя статическая, ударная и усталостная прочность композитов снижается, ограничивая тем самым их функциональные возможности.

Твердость. Твердость поверхностного слоя композита резко снижается (рис. 4.) из-за образования пористой структуры после механической обработки.

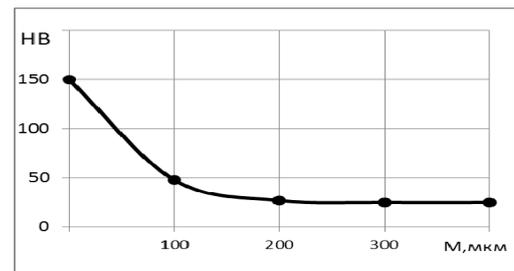


Рисунок 4 – Изменение твердости стеклопластика в зависимости от глубины дефектного слоя

Резкое уменьшение твердости поверхностного слоя с увеличением глубины дефектного слоя предполагает подбор условий резания, при которых глубина этого слоя не должна превышать 20-50 мкм.

Стойкость к влагопоглощению (пористость). Наличие влаги в поверхностном слое композита существенно ухудшает его механическую прочность, стойкость к электрохимической коррозии и диэлектрические показатели [4]. Механическая обработка полимерных композитов существенно повышает их влагопоглощение, в основном за счет наличия пористой, деструктурированного, механодиспергированного поверхностного слоя.

Пористость (влагопоглощение) композита измеряли путем заполнения образцов жидкостью. Сухие образцы взвешивали на аналитических весах на воздухе, а потом пропитывали в вакууме жидкостью. В качестве пропитывающей жидкости для ВПК использовали дистиллированную воду. Время пропитки – 24 часа. После пребывания в воде образцы протирали и сушили обдувом. Возможное растворение веществ из композита, а также внедрившихся в него продуктов износа инструмента в расчет не принимали. Водопоглощение – П вычисляли в процентах привеса

$$P = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \cdot 100\%$$

где m_1 и m_0 – масса сухого и побывавшего в воде образца.

На влагопоглощение влияют главным образом три фактора: глубина дефектного слоя, степень деструкции и гигроскопичность обрабатываемого материала. (рис. 5.)

Чем больше глубина дефектного слоя полимера, тем интенсивнее поглощается влага. Еще сильнее на влагопоглощение влияет степень разрушения полимерных составляющих композита.

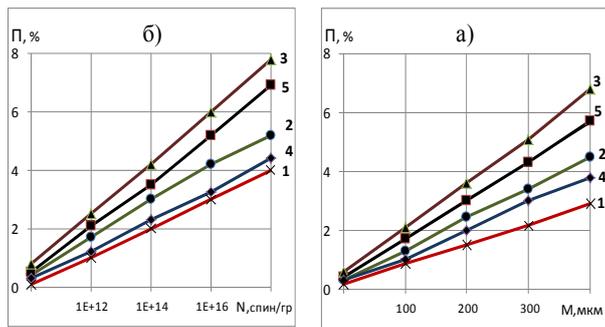


Рисунок 5 – Влияние а) – глубины, б) – степени разрушения поверхностного слоя композита на влагопоглощение. Обрабатываемый материал: 1 – стеклопластик, 2 – органоупластик, 3 – углепластик, 4 – стеклоорганопластик, 5 – углеорганопластик.

Степень влагопоглощения исходной структуры материала определяли помещая в воду образец не подвергшийся механической обработке (соответствует точке 0 на оси абсцисс графика на рис. 5а).

Коррозионная стойкость.

Электрохимическая коррозия является одной из наиболее распространенных форм коррозии. Она может происходить при наложении металлических крепежных деталей на изделия из композитов. Интенсивность этой коррозии определяется прочностью гальванического элемента, которая, в свою очередь, зависит от расстояния между этими материалами в электрохимическом ряду напряжений, степени поляризации и величины образующегося тока.

В соответствующем электролите эти факторы могут привести к коррозионному разрушению двух разнородных материалов. Полимерные композиционные материалы (ПКМ) обладают относительно высокой инертностью по сравнению с различными металлами (рис. 6.), однако в результате длительного пребывания в агрессивных средах или морской воде может вызвать коррозию.



Рисунок 6 – Электрохимический ряд напряжений некоторых материалов. Гальванический потенциал измеряли в 3,5% растворе NaCl при 25°C.

Механическая обработка волокнистых полимерных композитов приводит к смещению их положения в электрохимическом ряду в сторону положительной оси, что приводит к увеличению разности потенциалов с железосодержащими сплавами, титаном и алюминиевыми сплавами, с которыми зачастую используются композиты в конструкциях.

Смещение полимерных композитов в электрохимическом ряду происходит в основном за счет разрушения полимерных составляющих, а глубина дефектного слоя определяет степень поглощения электролита, что усугубляет условия эксплуатации и создает дополнительные предпосылки к коррозии контактирующих металлов. На рис. 7. представлена зависимость гальванического потенциала углепластика от степени разрушения поверхностного слоя.

Коррозионная стойкость важнейшая эксплуатационная характеристика волокнистых полимерных композитов, которая определяет возможность использования этих материалов для изготовления корпусов глубоководных аппаратов, обтекателей подводных лодок, консольных балок для подводных крыльев катеров, электроизоляторов, работающих в агрессивных средах с повышенной влажностью и температурой, кожухи и теплозащитные экраны, защитные купола антенн, лопасти винтов вертолетов и т.д.

Анализ зависимости электрохимического потенциала углепластика от количества стабильных макрорадикалов в поверхностном слое (рис. 7) позволяет установить, что степень разрушения полимерных составляющих композита должна быть на уровне $10^{10} - 10^{11}$ спин/гр. (Степень разрушения оценивали с помощью электронного парамагнитного резонанса).

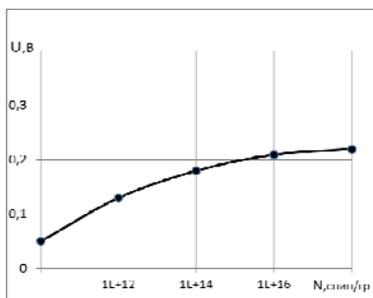


Рисунок 7 – Зависимость электрохимического потенциала углепластика от количества стабильных макрорадикалов в поверхностном слое

Износостойкость трущихся поверхностей (сопротивление истиранию) – устанавливали по стандартной (ГОСТ 11012-64) методике. Истирание проводили на машине трения МПИ - 2 по свежему следу на абразивной шкурке (Э) зернистостью 10/7 при скорости 0,25 м/с и продольной подаче 10 мм/об, равной ширине (10 мм) испытываемого образца (10×10×20) при нагрузке 10Н. Интенсивность истирания jI измеряли в мм/мин по косому срезу с помощью микроскопа МИМ-8М. Результаты исследования влияния глубины разрушенного слоя на интенсивность истирания приведены на рис. 8.

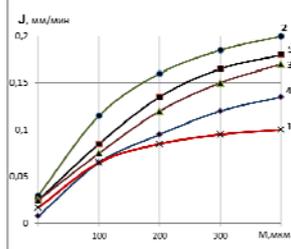


Рисунок 8 – Интенсивность истирания поверхностного слоя при различной глубине дефектного слоя: 1 – стеклопластика, 2 – органоупластика, 3 – углепластика, 4 – стеклоорганопластика, 5 – углеорганопластика.

Согласно графиков рис. 8. интенсивность истирания полимерных композитов, имеющих глубину дефектного слоя 350 мкм почти в 10 раз выше, чем интенсивность истирания исходной структуры. Очевидно, что в парах трения

механически обработанные поверхности должны иметь глубину дефектного слоя не более 20-30 мкм.

Диэлектрические свойства определяли после специальной обработки резанием образцов из стеклопластика. Вырезали образцы 100×100×10 мм для испытания по стандартной методике (ГОСТ6433-71) на объемное (R_v) поверхностное (R_s) электрическое сопротивление, на электрическую прочность ($E_{пр}$) и тангенс угла диэлектрических потерь ($tg\delta$). На рис. 9 показано влияние глубины дефектного слоя на диэлектрические свойства стеклопластика.

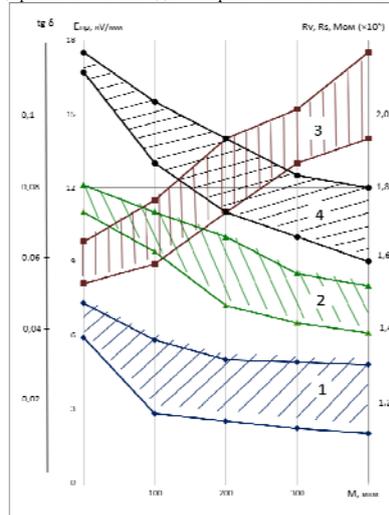


Рисунок 9 – Влияние глубины дефектного слоя стеклопластика на: 1–поверхностное, 2– объемное, электрическое сопротивление, 3– тангенс угла диэлектрических потерь, 4– электрическую прочность.

Из анализа графиков следует, что больше всего с увеличением глубины дефектного слоя изменяется показатель $tg\delta$, который с увеличением глубины дефектного слоя от 0 до 350 мкм возрастает до 50-60%, несколько меньше

отклонение имеет показатель E_{np} - до 45-50%, почти одинаковым отклонение у R_v и R_s - до 25-30%. Ухудшение диэлектрических характеристик с увеличением глубины дефектного слоя связано с поглощением влаги и других атмосферных ингредиентов, увеличивающих его электропроводность. Нельзя не учитывать при этом влияния засоренности металлическими продуктами износа инструмента поверхностного слоя стеклопластика, которая, несомненно, тоже ухудшает диэлектрические характеристики.

Выводы

Установленная взаимосвязь между качеством поверхностного слоя волокнистых полимерных композитов после механической обработки и их эксплуатационными свойствами создает предпосылки для обеспечения требуемого уровня этих свойств на стадии механической обработки изделий из композитов. Обеспечение более высокого уровня эксплуатационных свойств волокнистых полимерных композитов за счет повышения качественных характеристик поверхностного слоя позволяет расширить функциональные возможности вышеупомянутых материалов, что в свою очередь создает предпосылки для замены дорогих титановых сплавов и легированных сталей. Это позволяет применять полимерные композиты в разных высокоразвитых отраслях производства:

- **АЭРОКОСМИЧЕСКАЯ ОТРАСЛЬ:** детали фюзеляжа, корпуса ракет, обтекатели ракет, космические капсулы, защитные купола антенн, рули, закрылки, панели для крыльев, кожухи электрических устройств, передние и задние кромки, трубопроводы, шангоуты, лопасти винтов для вертолетов, обтекатели антенн и двигателей, детали крыльев малых летательных аппаратов, гребни консоли крыла, горизонтальные стабилизаторы, предкрылки, рули поворота, кесон крыла, трубчатые стойки, ступицы винта, лонжероны, подкрыльевые обтекатели, нервюры, панели обшивки, зализы стыка крыла с фюзеляжем, спойлеры, верхний руль направления, балки крепления пола, пол, гондолы и детали двигателя, дверцы приборных отсеков, кожухи и теплозащитные экраны, ребра жесткости, емкости для хранения сжатых газов, контейнеры для пуска ракет.
- **СУДОСТРОЕНИЕ:** корпуса малых и средних судов, палубы, обтекатели, палубные надстройки, мачты, резервуары, поплавки,

буи, шангоуты, стрингеры, переборки, кожуха, обтекатели подводных лодок, балки, рубки, командирские мостики, резервуары для хранения топлива и питьевой воды, крышки гидрокаторов, обтекатели антенн, защитные покрытия для металлов и дерева, стойки, панели.

- **АВТОМОБИЛЬНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ:** кузова автомобилей, панели пола, ящики для аккумуляторных батарей, бамперы, капоты и крышки багажников, задние откидные борта фургонов, передние панели, корпуса фар, крылья, кронштейны крыла, опорные кронштейны, основания сидений, задние двери грузовых пассажирских автомобилей-фургонов, мостики вдоль наливных горловин автоцистерн, боковые кронштейны буферов, дверные кронштейны, балки радиаторов, панели крыши и кузова, детали бампера.
- **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА:** корпуса приборов, корпуса низковольтных распределительных устройств, корпуса механизированного инструмента, корпуса кондиционеров с улитками вентиляторов, детали крепления органов управления, воздухопроводы, детали холодильников, посудомоечных машин, увлажнителей, электроизоляторы.

К практическим результатам проведенного исследования следует также отнести разработку ряда экспериментальных методик: определения статических и динамических свойств композитов, количественной оценки качества поверхностного слоя после механической обработки, определения влияния качества поверхностного слоя композитов после механической обработки на их эксплуатационные характеристики.

Список использованных источников: 1. Батаев А.А. Композиционные материалы. – М.: Логос, 2006. – 400 с. 2. Белецкий Е.Н. Обеспечение заданной точности и качества поверхности на операциях сверления углепластиков на основе моделирования процесса резания – дисс. на соиск. степ. канд. техн. наук. – Саратов, 2010. – 184 с. 3. Тарасюк А.П. Научные основы расширения функциональных возможностей полимерных композитов за счет создания эффективных процессов механической обработки. – дисс. на соиск. учен. докт. техн. наук. – Харьков 2011. – 484 с. 4. Дрожжин В.И. Физические особенности и закономерности процесса резания слоистых пластмасс. дисс. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук. – Харьков, 1982. – 388 с.

Поступила в редакцию 15.05.2012

УДК 621.794.61:621.891: 537.533.2

В.В. Тихоненко, А.М. Шкилько, канд. физ.-мат. наук, Харьков, Украина

ИЗНАШИВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ, УПРОЧНЕННОГО МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

Исследованы триботехнические характеристики покрытия, полученного методом микродугового оксидирования на алюминии в сплаве Д16, с привлечением физических методов диагностики.

Досліджено триботехнічні характеристики покриття, отриманого методом микродугового оксидування на алюмінієвому сплаві Д16, із залученням фізичних методів діагностики.

Tribological characteristics of coatings produced by microarc oxidation on aluminum alloy D16 are researched with the involvement of physical methods of diagnosis.

Введение. Детали из алюминиевых сплавов, применяемые в современном оборудовании, обладают повышенной прочностью и хорошей технологичностью изготовления, но имеют низкую твердость и невысокую износостойкость. Одним из наиболее перспективных способов поверхностного упрочнения является метод микродугового оксидирования (МДО), который позволяет получать на деталях из алюминия и его сплавов многофункциональные покрытия с уникальным комплексом свойств и высокими эксплуатационными характеристиками [1]. Технология МДО является гибкой и экологически чистой, она универсальна, поскольку может применяться как при изготовлении, так и при восстановлении деталей машин. Однако, технология МДО не позволяет получать одинаковую износостойкость упрочненных оксидных слоев, т.к. при приближении к поверхностным слоям основного металла их твердость снижается. Неодинаковое распределение твердости способствует различной кинетике изнашивания сопрягаемых деталей при эксплуатации и особенно при их приработке.

Износостойкость деталей машин должна оцениваться в соответствии со свойствами их поверхностных слоев и процессами, протекающими при износе. Изменения в поверхностном слое при эксплуатации характеризуются степенью пластической деформации, процессами диффузии и адсорбции, термическими и усталостными явлениями. В результате этих изменений возможно как упрочнение поверхностного слоя (механическое, термодиффузионное), так и разупрочнение [2].

Согласно ГОСТ 30480-97 исследование поверхностей, подвергнутых износу, предлагается осуществлять методами акустической эмиссии, контактной разности потенциалов (КРП), микротвердости и т.д. Данные методы и были выбраны нами при проведении исследований, но вместо акустической эмиссии выбрана не менее эффективная экзоземиссионная диагностика. На интенсивность и кинетику экзоземиссионной эмиссии влияют характеристики материала, из которого изготовлены образец и контртело (химический состав, размер зерен, дефектность структуры, физическо-химическое состояние поверхности), состав атмосферы, окружающей трущуюся пару, а также вид трения [3]. Метод КРП обладает высокой чувствительностью к изменению физико-химических свойств поверхности трения и позволяет контролировать режимы трения, изучать динамику дефектов на трущейся поверхности, выявлять локальные очаги разрушения поверхности трения, изучать взаимодействие смазочных материалов с поверхностью трения. Он может найти широкое применение при подборе материалов и смазок для конкретных узлов трения, т.е. при решении широкого ряда задач практической триботехники [4].

Целью настоящей работы является исследование триботехнических характеристик покрытия, полученного методом микродугового оксидирования на алюминии в сплаве Д16, с привлечением физических методов диагностики.

Методика эксперимента.

Износостойкость поверхностей образцов с покрытием, полученным микродуговым оксидированием на алюминии в сплаве Д16, исследовали в динамике трения в условиях сухого трения по схеме «диск-колодка». МДО-покрытие толщиной 150-200 мкм наносилось на диск.

Экспериментальная установка для исследования процессов трения включала три основных узла – измеритель КРП, устройство для измерения фотостимулированной эмиссии заряженных частиц (ФСЭЭ) и узел трения. Устройство для измерения ФСЭЭ представляло собой модифицированный метод измерения фотоэмиссионного тока на воздухе [5]. Узел трения принципиальных отличий от известных не имел. Стимулирование экзоземиссионной эмиссии осуществлялось ультрафиолетовым осветителем с набором светофильтров.

До и после эксперимента измерялись микротвердость дорожек трения с помощью ПМТ-3М. Износ покрытий определялся по уменьшению размера

тела в направлении, перпендикулярном к поверхности трения (линейный износ, J), при помощи индикатора часового типа с точностью $\pm 0,001$ мм.

Общий вид устройств для совместного исследования трения, экзозмиссии и КРП представлены на рис. 1.

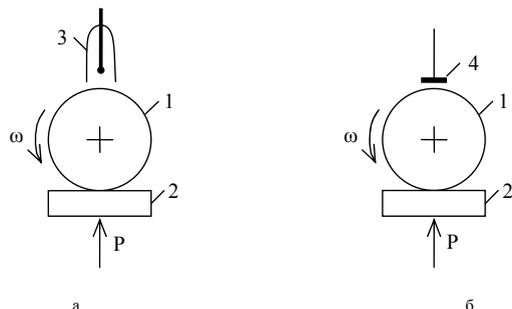


Рисунок 1 – Схемы узлов устройства для регистрации экзозмиссии (а) и КРП (б) в динамике трения: 1 – диск с МДО-покрытием; 2 – контролобразец (колодка); 3 – детектор экзозлектронов, 4 – эталонный образец измерителя КРП

Методика измерений экзозмиссии при трении аналогична предложенной в работе [6]. Диск 1 подвергается трению о контртело 2, а экзозмиссия измеряется детектором 3, находящимся в верхней части кольца. Свободное пространство перед детектором облегчает его монтаж и эксплуатацию, смену заградительных щитков, установку эталона, а также позволяет вести визуальное наблюдение и применять одновременно другие методы исследования. При снятии нагрузки контртело 2 опускается, трение прекращается в нужный момент, а кольцо продолжает вращаться на холостом ходу, не внося дополнительных погрешностей в экспериментальные результаты. Комплекс аппаратуры, обслуживающей счетчик, с добавлением двухкоординатного самопишущего прибора ПДС-021 позволял непрерывно наблюдать и записывать возникающую в воздушной среде в динамике трения электронную эмиссию.

На рис. 1 (б) вал 1 подвергается трению о контртело 2, выполненное в виде колодки. КРП измеряется между трущейся поверхностью вращающегося вала 1 и эталонным образцом 4.

Сухое трение является наиболее жестким режимом изнашивания пар трения. При этом наиболее четко выявляются свойства материалов, связанные с сопротивлением его изнашиванию, когда происходит непосредственное взаимодействие контактирующих поверхностей. В процессе сухого трения верхний слой металла подвергается интенсивной пластической деформации, развитию дислокационной структуры в приповерхностных слоях металлов и сплавов, интенсивной эмиссии заряженных частиц и изменению КРП.

Механическое воздействие при трении переводит поверхностные слои металла в энергетическое состояние, когда энергии квантов облучения достаточно для возникновения эмиссии электронов. В таком состоянии, как допускают авторы [6], под воздействием энергии облучения возможен процесс последовательного (каскадного) перехода электрона с более низких на более высокие энергетические уровни, который обладает определенным временем развития. Информация, получаемая с помощью методов экзозмиссии заряженных частиц и КРП, позволяет проследить достаточно глубокую связь интенсивности эмиссии экзозлектронов и изменения поверхностного потенциала с различными параметрами, характеризующими дефектность поверхности при трибонагрузении.

В результате сравнительной оценки износостойкости оксидных слоев на алюминии Д16 установлено, что у композиционного материала с оксидным покрытием износостойкость выше, чем у материала без покрытия. Измерения микротвердости показали, что характер ее изменения одинаков для каждой марки упрочненного сплава и прослеживается взаимосвязь с интенсивностью изнашивания оксидных слоев, что не противоречит результатам работы [7].

На рис. 2 представлены результаты измерений скорости изнашивания, интенсивности ФСЭЭ, КРП во времени и распределение микротвердости по толщине МДО-покрытия. По интенсивности изнашивания в покрытии выделяются три зоны, соответствующие трем слоям МДО-покрытия. Рыхлый поверхностный слой характеризуется наибольшей интенсивностью и скоростью изнашивания, поскольку имеет максимальное количество микро- и макродефектов, наибольшую из всех слоев пористость и относительно низкую величину микротвердости. В основном рабочем слое с наивысшей микротвердостью (до 22-25 ГПа) наблюдается наименьшая скорость изнашивания вплоть до переходного слоя, являющегося приграничной зоной перехода между материалом детали и покрытием. Когда опора нагрузки проходит границу раз-

дела покрытие-подложка и достигает мягкой, необработанной алюминиевой подложки, происходит резкое увеличение скорости износа.

Авторы работы [8] причинами наивысшей износостойкости МДО-слоев на сплавах типа Д16 считают, во-первых, то, что нитевидные кристаллы α -Al₂O₃ (корунда), содержащиеся в основном слое покрытия и закрученные в клубки совместно с мелкокристаллической матрицей, практически лишены возможности деформационных смещений за счет деформации одной матрицы, а, во-вторых, локализацию очагов разрушения на поверхностях, имеющих ячеистую структуру, поскольку микротрещины, разделяющие отдельные глобулы, задерживают смазку и уменьшают напряжения, передаваемые от деформированной глобулы к соседним.

Таким образом, учитывая вышесказанное и работы [7-10], можно заключить, что МДО-покрытие, по сути, является композиционным материалом, который удачно сочетает в себе относительную пластичность матрицы, состоящей из твердого раствора муллита 3Al₂O₃·2SiO₂ с незначительным количеством γ -Al₂O₃ и сложнooksидных соединений элементов основы с упрочняющей фазой α -Al₂O₃, которая, главным образом, и обеспечивает высокую износостойкость покрытий.

Выявлено, что сплав Д16 по сравнению с АМгб и АК5 технологичнее, поскольку имеет повышенную микротвердость упрочненных слоев за счет значительного содержания α -фазы Al₂O₃, а также, как предполагается в работе [7], вследствие большей плотности и меньшей величины зерна при оксидировании.

В начальной фазе процесса трения наблюдается скалывание микронеровностей. В процессе приработки на поверхности образца возникает большое количество эмиссионно-активных центров, которыми являются обнаженные поверхности срезанных микронеровностей с повышенной плотностью дислокаций [3]. Количество таких центров в процессе приработки увеличивается за счет увеличения реальной площади контакта, в результате чего наблюдается рост ФСЭЭ в начальной фазе совместной работы образца – контртела, причем наклон кривой почти постояен. Интенсивность ФСЭЭ увеличивается с ростом скорости изнашивания, либо вместе с увеличением давления контртела на образец или при увеличении угловой скорости образца [3]. За определенный отрезок времени при постоянной нагрузке эмиссия достигает насыщения. Повышенному значению микротвердости основного слоя покрытия соответствует менее интенсивная экзозмиссия. С возрастанием износа до определенной глубины слоя наступает разупрочнение металла, раз-

рушение его поверхностного слоя, что приводит к изменению интенсивности и кинетики ЭЭ во времени. Затуханию эмиссии экзозлектронов отвечает аналогичное увеличение микротвердости поверхности трения.

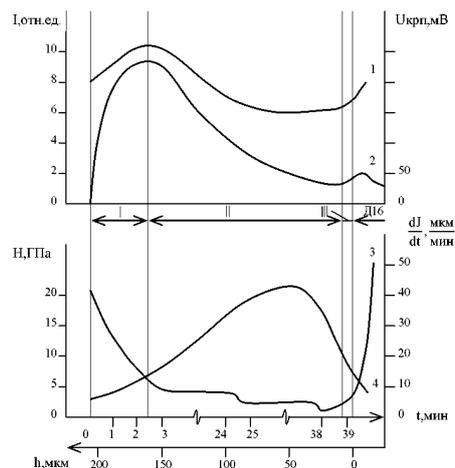


Рисунок 2 – Изменение КРП (1), интенсивности ФСЭЭ (2), скорости изнашивания (3) во времени и распределение микротвердости (4) по толщине покрытия, нанесенного методом МДО: I – наружный слой, II – основной слой, III – переходной слой.

Изменения КРП характеризуют те процессы, которые проходят в материале пары трения в различные моменты ее работы. В начальный момент работы пары отмечается скачкообразное повышение КРП, что связано с первоначальным этапом в формировании поверхностей трения (разрушение адсорбционных слоев, обнажение ювенильных участков, приработка контактируемых поверхностей), а также особенностью строения МДО-покрытия. При достижении основного слоя наблюдается снижение КРП относительно ее исходной величины, и через некоторое время КРП принимает установившееся значение до достижения материала подложки. В случае максимальных значений КРП поверхность образца имеет наибольшую дефектность, средним уча-

сткам подъема КРП соответствует интенсивное образование параллельных поверхности трения трещин, минимальное упрочнение соответствует наибольшим значениям КРП. Выявлена зависимость между коэффициентом трения и КРП пар трения: с увеличением коэффициента трения КРП возрастает.

Отметим, что МДО-покрытия обладают высокими антифрикционными свойствами, однако, наличие рыхлого слоя существенно ухудшает антифрикционные свойства пары трения, в процессе эксплуатации наблюдается осыпание частиц этого слоя покрытий, в зонах трения скапливаются порошкообразные продукты износа, которые существенно повышают коэффициент трения и интенсивность износа. Поэтому при работе МДО-покрытий в парах трения рекомендуется предварительно удалять рыхлый слой механическим путем или предусматривать операцию приработки.

Заключение

На основании проведенных исследований показано, что износостойкость оксидных слоев зависит от физико-химического состояния поверхности, оказывающего влияние на величину коэффициента трения, и микротвердости слоя. Высокая твердость, низкий коэффициент трения, малая пористость и шероховатость получаемых МДО-покрытий позволяет использовать их в качестве износостойких в различных областях промышленности.

Планируется разработка способа контроля многофункциональных МДО-покрытий по совокупности контролируемых характеристик и рабочей методики испытаний износостойких покрытий, полученных микродуговым оксидированием на алюминиевых сплавах.

Список использованных источников: 1. Тихоненко В.В. Метод микродугового оксидирования / В.В. Тихоненко, А.М. Шкелько // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 2/13 (56). – С. 13-18. 2. Зенкин Н.А. Повышение эксплуатационных характеристик композиционных материалов путем оптимизации упрочняющих технологий: Монография / Зенкин Н.А., Копылов В.И. – Киев, 2002. – 271 с. 3. Хандель-Повержа З. Экзоэлектронная эмиссия при исследовании трения скольжения стали 45 / З. Хандель-Повержа, А. Перикала, М. Пурж // Трение и износ. – 1981. – Т. 11, № 1. – С. 22-26. 4. Ибрагимов Х.И. Работа выхода электрона в физико-химических исследованиях / Ибрагимов Х.И., Корольков В.А. – М: Интермет Инжиниринг, 2002. – 526 с. 5. Шкелько А.М. Экзоэмиссионная диагностика поверхности конструкционных материалов: монография / Шкелько А.М. – Харьков: НоуДиж, 2009. – 240 с. 6. Евдокимов В.Д. Экзоэлектронная эмиссия при трении / Евдокимов В.Д., Семов Ю.И. – М: Наука, 1973. – 182 с. 7. Федоров В.А. Влияние микродугового оксидирования на износостойкость алюминиевых сплавов / В.А. Федоров, Н.Д. Великосельская // Трение и износ. – 1989. – Т. 10, № 3. – С. 521-524. 8. Особенности микроструктуры упрочненных слоев, получаемых микродуговым оксидированием / В.П. Алексин, В.А. Федоров, С.И. Бульчев [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 1991. – № 5. – С. 121-126. 9. Кинетика изнашивания покрытий, нанесенных методом микродугового оксидирования / А.А. Петросян, В.Н. Малышев, В.А. Федоров [и др.] // Трение и износ. – 1984. – Т. 5, № 2. – С. 350-353. 10. Износостойкость покрытий, нанесенных анодно-катодным микродуговым методом / Г.А. Марков, В.И. Белавенцев, О.П. Терлева [и др.] // Трение и износ. – 1988. – Т. 9, № 2. – С. 286-290.

Поступила в редакцию 12.05.2012

297

УДК 621.7

Т.Л. Тринева, Ю.Г. Гуцаленко, Е.В. Балака, Харьков, Украина

СОВРЕМЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ УСКОРЕННОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЛОЖНОЙ МОДЕЛЬНОЙ ОСНАСТКИ

Наводиться огляд та приклади виконуваних в НТУ «ХПІ» розробок з прискореного виготовлення складної моделіної оснастки на основі застосування лазерних технологій послідовного генеративного формоутворення. Розробки підтримуються методикою прогнозування часу повного циклу виготовлення виробів для прийняття обґрунтованих рішень на різних стадіях планування та організації виробництва.

Ключові слова: модельна оснастка, прискорене виготовлення, лазерна стереолітографія, селективне лазерне спекання, час повного циклу, прогнозування.

Приводится обзор и примеры выполняемых в НТУ «ХПИ» разработок по ускоренному изготовлению сложной модельной оснастки на основе применения лазерных технологий последовательного генеративного формообразования. Разработки поддерживаются методикой прогнозирования времени полного цикла изготовления изделий для принятия обоснованных решений на ранних стадиях планирования и организации производства.

Ключевые слова: модельная оснастка, ускоренное изготовление, лазерная стереолитография, селективное лазерное спекание, время полного цикла, прогнозирование.

An overview and examples of carried out in the NTU "KPI" development of the composite pattern equipment rapid manufacturing based on the use of laser technology layered generative morphogenesis are presented. The development is supported by the methods of forecasting the full cycle time of manufacturing of products to make informed decisions in the early stages of planning and organization of production.

Keywords: model tooling, rapid manufacturing, laser stereolithography, selective laser sintering, full-time, forecasting.

Введение. Роль скорости материализации конструкторских решений в конкурентном развитии промышленности особенно возросла в соответствующих нынешнему пятому и зарождающемуся на его базе шестому технологическому укладу [1] условиях глобализации экономики и открытого информационного пространства. Основанная на лазерном спекании порошковых композиций техническая идеология быстрого прототипирования послойным формообразованием [2] заданных электронным чертежом или аналитическими виртуальными конструкциями, а также отображенных сканированием трехмерных реальностей сегодня реализуется в широкой гамме оборудования различных производителей применительно к производству твердотельных объектов из различных материалов – от полимеров до твердых сплавов.

Представленные статьи разработки опираются на практику Конструкторско-технологического бюро верификационного моделирования и подготовки производства, которое в рамках Учебно-научно-производственного объединения «Высокие технологии в машиностроении» при НТУ «ХПИ» является полигоном исследований по НИР «Разработка метода статистического

прогнозирования времени полного цикла рабочих процессов технологий лазерной стереолитографии (SLA) и селективного лазерного спекания (SLS)» (2010-2012 гг., научный руководитель профессор Грабченко А.И., номер государственной регистрации 0110U001237 (шифр M2237 в НТУ «ХПИ»). Страной-экспортером для этого КТБ первого в Украине оборудования реализации технологий SLA и SLS стала в 2001 г. Германия (3D Systems GmbH) – современный лидер европейской экономики и наиболее успешная европейская страна в условиях преодоления испытаний мировым кризисом последних лет, что не может не определять оценку актуальности и качества выполняемых в этой стране индустриальных проектов и научных исследований.

По данным одного из них, являющегося непосредственным предшественником темы M2237 и выполненного воспитанницей научной школы физики процессов резания НТУ «ХПИ» и диссертантом Магдебургского университета Кушаренко О.Н. [3], а также сайта www.werkzeug-formenbau.de в немецкоязычном сегменте Интернет, собственно германский опыт техники и технологий быстрого прототипирования генеративным металлическим формообразованием опирается на 5 основных предприятий и 10 основных поставляемых ими технологических установок (систем): кроме упомянутого выше предприятия-партнера КТБ из УНПО «Высокие технологии в машиностроении» 3D Systems GmbH (Darmstadt) с его 3D Systems Vanguard Anlage and Sinterstation 2500 plus. 230 SLS, это Concept Laser GmbH (Lichtenfels) с установками M1 CUSING, M2 CUSING, M3 Linear; EOS GmbH (Krailing) с установками EOSINT M 250 Xtended и EOSINT M 270; MCP Group HEK GmbH (Borcheln) с установками MCP Realizer 100 и MCP Realizer 250; Trumpf Laser and Systemtechnik GmbH (Ditzingen) с установками Trumaform LF 250 и Trumaform DMD 505. Рабочими металлами формообразования в возможных этих установках являются конструкционные и инструментальные стали, в том числе высококачественные и специальные, а также цветные (Ti, Al, Cu и др.) и чугуны.

Наше представление о современной организации ускоренного изготовления сложной модельной оснастки в Украине исходит, во-первых, из использования возможностей и адаптирования новейших технологий отечественной практики быстрого прототипирования для таких задач; во-вторых, – из использования адекватной этим возможностям методологии статистического прогнозирования длительности полного цикла генеративного создания изделий. Это представление опирается на собственный [4] и предшественников [5, 6] диссертационный исследовательский опыт, а также на учебно-научно-производственные результаты дипломного проектирования на базе КТБ в составе УНПО «Высокие технологии в машиностроении» и его общую практику [7].

Технологические решения быстрого прототипирования модельной оснастки. Переход к порошковым технологиям лазерного спекания модельной

оснастки потребовал проведения специальных материаловедческих исследований, ввиду неочевидности поведения традиционных материалов быстрого прототипирования при их использовании в изготовлении модельной оснастки в условиях литейного производства, где формообразующие элементы как кокилей, так и пресс-форм работают в условиях сложного термоциклического нагружения. В результате обоснован выбор определенных композиционных металлических порошков (KM) для целевого формообразования ответственных деталей модельной оснастки лазерным спеканием при их послойном формообразовании, учитывающий специфику эксплуатации модельной оснастки и обеспечивающий ее высококачественную долговечность. Например, KM_{Fe-Cr} рекомендовано использовать как материал литейной оснастки для литья алюминиевых сплавов в единичном производстве, а KM_{Fe-W} – для изготовления кокилей и пресс-форм при массовом производстве алюминиевых сплавов и тонкостенных чугунных отливок. Для получения литейной оснастки с повышенным сроком службы предложено инфильтрацию проводить хромистой бронзой, поддерживающей высокие эксплуатационные свойства модельной оснастки, изготовленной по маршрутной технологии с основным рабочим процессом SLS [4].

С повышением точности и качества изготовления отливок связано введение понятия и применение поправочного коэффициента отклонений размеров (K_c). Конкретные значения K_c рассчитаны для каждого типа технологий послойного лазерного формообразования, рассматриваемых установок и применяемых в них материалов. Для минимизации размерных отклонений изделий послойного лазерного формообразования от прототипов соответствующие значения K_c поправки следует взаимосвязано учитывать на стадии проектирования монолитной литейной оснастки (в расчетах размерных цепей) и основных технологий ее генеративного производства.

Для увеличения срока службы литейной оснастки за счет устранения факторов термического напряженного контакта матрицы и вставки, ускоряющего их разрушение в циклической эксплуатации, величину зазора между вставкой и матрицей предложено выбирать с учетом максимального эксплуатационного значения коэффициента термического расширения материала вставки, что следует учитывать и в виртуальном формообразующем описании прототипов соответствующих объектов основных рабочих процессов SLS.

В результате разработанных [4] материаловедческих и технологических решений, в комплексе с результатами выполненными в УНПО «Высокие технологии в машиностроении» НТУ «ХПИ» предшествующих разработок [5, 6], впервые в отечественной практике ориентированных на использование SLS как основного рабочего процесса изготовления модельной оснастки со сложной формообразующей поверхностью, в Украине стало реальностью ее высокотехнологичное ускоренное производство, обеспечивающее ей продолжительный срок службы и высокие эксплуатационные качества, позволяющие

производить отливки с улучшенной размерной и микрогеометрической инженерией поверхностей, минимальным исходной металлоемкостью и припусками на окончательную механическую обработку. Пример отображения (общий вид) форморазмерного задания литейной формы в программном пакете Solid Cast с системным использованием метода разности конечных элементов для постановки производственной задачи быстрого прототипирования приведен на рис. 1.

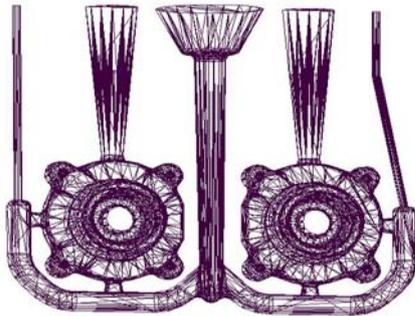


Рисунок 1 – Отливка «Крышка» с литниковопитающей системой: сеточная 3D модель (Solid Cast, [4])

Применение технологии SLS позволило в практике КТБ УНПО «Высокие технологии в машиностроении» НТУ «ХПИ» [4] отойти от традиционного модельного комплекта с подмодельной плитой и формирующим внутреннюю полость заготовки стержневым ящиком и перейти к прогрессивному модельному модулю литья в песчаные формы из единого основного формообразующего элемента (рис. 2) с понижением припуска на последующую обработку благодаря избавлению от погрешности соосности сопрягаемых стержней при сборке традиционной модельной оснастки.

Переход к производимым по технологии SLS модельным модулям позволяет конструировать разъемы любой степени сложности, выполнять внутренний контур отливки при минимальной величине погрешностей расположения, значительно уменьшить несоосность между моделью и стержнями, минимизировать погрешности формы и расположения модуля в сборе. Из опытно-экспериментальной апробации разработки технологии литья в песчаные формы на основе модельных модулей, полученных методом SLS, позволяет на 30 – 40% повысить точность отливки, в 4 – 5 раз снизить шероховатость ее поверхности, значительно сократить объем механических опера-

ций окончательной обработки. Значительное повышение качества отливок сочетается при этом с ощутимой экономией металла в их производстве.



Рисунок 1 – Рольевые варианты исполнения модельного модуля: стержневой ящик с дополнительными элементами-фиксаторами (а) и модель с подмодельной плитой (б). Лазерная стереолитография на установке SLA-5000 (3D Systems GmbH): КТБ УНПО «Высокие технологии в машиностроении» НТУ «ХПИ»

Прогнозирование времени полного цикла. Предварительные расчетные оценки времени полного цикла изготовления модельной оснастки маршрутными технологиями, основанными на селективном лазерном спекании, осуществляются в соответствии с выполненной в НТУ «ХПИ» под руководством проф. Грабченко А.И. и защищенной [6] разработкой.

Пример параметрического детерминирования обобщенной расчетной схемы применительно к конкретной задаче приведен в табл. 1, а пример комплексной прогностической оценки, включающей определение риска выполнения проекта послыюного создания изделий в установленные сроки, – в табл. 2. Оба примера взяты из реальной практики дипломного проектирования в системе подготовки специалистов в НТУ «ХПИ» на материальной базе УНПО «Высокие технологии в машиностроении» и представлены по материалам дипломных проектов специалистов инженерной механики, подготовленных студентами Крысанем М.А. (тема дипломного проекта: Разработка технологического процесса ускоренного изготовления деталей типа «маховик» для шлифовальных станков производства ООО «ХАРВЕРТ»), руководителем проф. Добросок В.Л., выпуск 2010 г.) и Балабасем Г.Г. (тема дипломного проекта: Проектирование цеха и разработка технологического процесса по изготовлению детали «щека гидротурбины» СВ 1140-280-48УХЛ4), руководителем к.т.н. Витязев Ю.Б., выпуск 2012 г.).

В табл. 2, наряду с результатами автоматизированного расчета статистических оценок длительности звеньев и всей временной цепи в полном цикле изготовления изделия по рассматриваемому учебно-научно-

производственному примеру, представлены их фактические длительности в практических реализациях на производственной базе Конструкторско-технологического бюро верификационного моделирования и подготовки производства при УНПО «Высокие технологии в машиностроении» НТУ «ХПИ». Сопоставление предварительных расчетных оценок с последующей реальностью подтверждает высокую эффективность разработанной [6] прогностической методики.

Таблица 1 – Элементная параметризация при прогнозировании полного цикла изготовления изделия: объект изготовления – маховик, основная технология – SLS (по материалам дипломного проекта студента Крысаня М.А.)

Эле-мент [6]	Типы и значения параметров (ДП и СП – детерминированные (ДП) и стохастические (СП) параметры соответственно)
T_{3Dmod}	время создания электронных 3D моделей изделий – СП (нечеткий) Par1: распределение $Triang(x, X_{min}=2,000 E1, X_{mod}=3,200 E1, X_{max}=4,000 E1)$
T_{PP1}	продолжительность постпроцесса № 1 (очистка) – ДП Par3: значение 1,0000 E2
T_{PP2}	продолжительность постпроцесса № 2 (инфильтрация) – СП (нечеткий) Par4: распределение $Trapez(x, X_{min}=2,00 E1, X_{mod}=2,400 E1, X_{max}=2,800 E1, X_{max}=3,200 E1)$
T_{PP3}	продолжительность постпроцесса № 3 (доводка) – ДП Par3: значение 1,5000 E1
T_{Home}	подготовит. операции – СП Par6: распределение $Rand(x, X_{min}=2,500 E0, X_{max}=4,500 E0)$
T_{End}	заклучит. операции – СП Par7: распределение $Rand(x, X_{min}=1,000 E1, X_{max}=0,200 E0)$
Y_A	ширина рабочей области, занимаемой изделием по оси Y – ДП Par8: значение 3,500 E2
H_W	высота рабочей области, занимаемой изделием по оси Z – ДП Par9: значение 6,000 E1
S_A	площадь рабочей области, занимаемой изделием – ДП Par10: значение 2,500 E3
K_S	вероятностный коэффициент заполнения рабочей области изделием – СП Par11: распределение $Rand(x, X_{min}=0,700 E1, X_{max}=0,800 E0)$
K_Y	вероятностный коэффициент размера сечения по оси Y – СП Par12: распределение $Rand(x, X_{min}=0,300 E0, X_{max}=0,700 E0)$
D_L	диаметр пятна лазерного луча – СП Par13: распределение $Rand(x, X_{min}=0,230 E0, X_{max}=0,270 E0)$
V_L	скорость луча лазера – СП Par14: распределение $Rand(x, X_{min}=6,000 E3, X_{max}=8,000 E3)$
h_C	толщина формируемого единичного слоя – ДП Par15: значение 0,150 E0

Продолжение таблицы 1	
K_{WR}	коэффициент проходов луча при построении изделий – СП Par16: распределение $Rand(x, X_{min}=1,000 E0, X_{max}=2,000 E0)$
K_{AR}	коэффициент проходов луча при построении дополнительных технологических элементов – ДП Par19: значение 1,000 E0
h_{WP}	глубина дополнительного опускания платформы при построении изделий – СП (нечеткий) Par20: распределение $Triang(x, X_{min}=1,000 E-2, X_{mod}=0,150 E0, X_{max}=0,200 E0)$
V_P	скорость опускания рабочей платформы – СП (нечеткий) Par22: распределение $Triang(x, X_{min}=1,000 E0, X_{mod}=2,000 E0, X_{max}=3,000 E0)$
L_C	длина подвода-перебега выравнивающего элемента установки – СП (нечеткий) Par23: распределение $TriangRight(x, X_{min}=5,000 E0, X_{max}=1,500 E1)$
V_C	скорость перемещения выравнивающего элемента установки – СП (нечеткий) Par24: распределение $TriangLeft(x, X_{min}=1,600 E2, X_{max}=1,900 E2)$
T_{WD}	время выдержки при построении изделий – СП (нечеткий) Par26: распределение $Triang(x, X_{min}=1,000 E1, X_{mod}=1,200 E1, X_{max}=1,300 E1)$

Таблица 2 – Сравнительные результаты статистического прогнозирования звеньев и всей временной цепи полного цикла создания модельной оснастки с основной технологией SLS для литейной формы детали «щека» (разработка студента Балабаса Г.Г.)

Звено полного цикла времени изготовления изделия		Трудоемкость, час.	
Рабочий процесс	Символ [6]	Прогноз	Факт
Основной процесс (SLS)	T_{Form}	39,94÷75,88 при уровне риска 5,5%	51
Постпроцесс 1 (очистка)	T_{PP1}	$Rand(x, X_{min}=8, X_{max}=12)$	10
Постпроцесс 2 (инфильтрация)	T_{PP2}	$Rand(x, X_{min}=2, X_{max}=3,2)$	2,6
Постпроцесс 3 (доводка)	T_{PP3}	$Rand(x, X_{min}=12, X_{max}=16)$	15
Полный цикл	T_{Sigma}	38,61÷72,43 при уровне риска 5,4%	61

Заключение. Использование техники и технологий быстрого прототипирования с послыюным выращиванием изделий посредством избирательного лазерного плавления-спекания позволяет получать высокотехнологичную и

долговечную модельную оснастку со сложной формообразующей поверхностью при значительном сокращении сроков ее изготовления и обеспечении высокого уровня размерной точности, плотности и качества поверхности отливок. Применение методики статистического прогнозирования длительности полных циклов рабочих процессов генеративного создания изделий SLA и SLS на стадии их проектирования поддерживает конкурентоспособность технологических альтернатив быстрого прототипирования перед традиционными технологиями изготовления модельной оснастки на ранних стадиях принятия обоснованных организационно-производственных решений.

Список использованных источников: 1. Converging Technologies for Improving Human Performance: Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science: NSF/DOC – sponsored report / Ed. by M. C. Roco and W. S. Bainbridge. – Arlington, Virginia: National Science Foundation, June 2002. – 424 p. – <http://www.wtec.org/ConvergingTechnologies/1/NBIC-report.pdf>. 2. Jacobs P.F. Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of Stereolithography. – USA: SME, 1992. – 434 p. 3. Kushnarenko O. Entscheidungsmethodik zur Anwendung generativer Verfahren für die Herstellung metallischer Endprodukte: Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktoringenieur / Berichte aus dem Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung – der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Band 14. – Aachen: Shaker Verlag GmbH, 2009. – 167 s. 4. Триева Т.Л. Технологические процессы изготовления литевой оснастки с использованием методов быстрого прототипирования: дис. ... канд. техн. наук: 15.16.04 – литейное производство. – Харьков, 2009. – 200 с. 5. Витязев Ю.Б. Расширение технологических возможностей ускоренного формообразования способом стереолитографии: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 – технология машиностроения. – Харьков, 2004. – 228 с. 6. Чернышов С.И. Повышение эффективности интегрированных технологий послойного выращивания изделий на основе статистического прогнозирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 – технология машиностроения. – Харьков, 2006. – 322 с. 7. Интегрированные технологии ускоренного прототипирования и изготовления / Л.Л. Товажнянский, А.И. Грабченко, С.И. Чернышов, Н.В. Везуб, Ю.Б. Витязев, В.Л. Добросок, Х. Кнут, Ф. Лиерат; под ред. Л.Л. Товажнянского и А.И. Грабченко. – Харьков: ОАО «Модель вселенной», 2005. – 224 с.

Поступила в редколлегию 15.06.2012

РОТОРЫ С ИЗМЕНЯЕМОЙ ПАРАМЕТРАМИ В ДИНАМИКЕ ДЛЯ КРУПНЫХ ВЕТРОВЫХ СТАНЦИЙ

In the report will be presented the investigation results of the working model of rotors with variable geometry parameters in dynamics. On the basis of aerodynamic and economic calculations the effectiveness of use of such designs for powerful wind stations is proved. The analysis of various designs and methods of selection of that or other design for various conditions of operation of wind installations in wide range of the wind speed change is given.

Известно, что со дня существования воздушных винтов остро стоит проблема создания конструкции воздушных винтов с возможностью изменения основных геометрических параметров в динамике. Это обусловлено тем, что винты фиксированного шага (ВФШ) не являются оптимальными для всех этапов эксплуатации агрегатов разного назначения. Решение этой проблемы возможно только лишь применением винта изменяемой геометрии (ВИГ), благодаря возможности одновременного изменения диаметра винта, а также угла установки и крутки лопастей в динамике.

В результате изготовления и испытания демонстрационной модели винта с изменяемыми геометрическими параметрами в динамике, нами было доказано, что например для авиации использование ВИГ дает возможность особенно эффективной оптимизации полета самолетов вертикального взлета и посадки (СВВП), обеспечением максимального диаметра и минимальной крутки в режиме висения и наоборот, минимального диаметра и максимальной крутки при горизонтальном полете. В частности при варировании диаметра ротора от 4,1 до 5,6 м и крутки лопастей в пределах $8^{\circ}-30^{\circ}$ можно увеличить грузоподъемность летательного аппарата примерно в 1,6 раза, или увеличить скорость полета 1,4 раза, или соответственно уменьшить расход топлива.

Для ветроэнергетических установок, особенно с большими мощностями, использование ВИГ-а даст возможность расширить диапазон максимальных значений КПД установки при изменении скорости ветра в большом диапазоне от 3 до 20-22 м/сек, а также обеспечить работоспособность установки при тех высоких скоростях ветра (22-35 м/сек), при которых существующие установки не в состоянии работать. Решение этой проблемы стала особенно актуальной после известной катастрофы в Фукусиме, Японии. В результате которого все ведущие страны мира стараются максимально заменить долю атомной энергии другими видами в общем энергетическом балансе. На сегодняшний день, для этой цели более эффективный метод, чем ветроэнергетика по эко-

номическим и экологическим критериям, а также потенциально возможным осваиваемым объемом энергии, к сожалению, не существует.

Проведенные предварительные аэродинамические и экономические расчеты доказывают, что с помощью использования разработанной нами конструкцией можно увеличить годовой объем выработанной каждой ветростанцией энергию минимум на 100%-ов (Рис. 1).

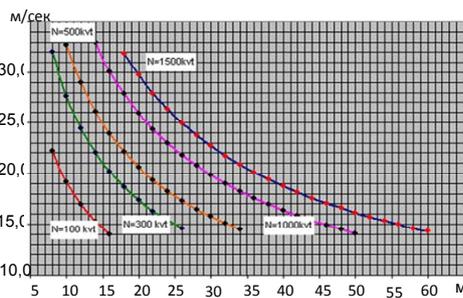


Рисунок 1 – Зависимость между диаметром ротора и скоростью потока ветра при разных мощностях установок.

Наряду многочисленных публикаций исследователей разных стран [1,2,3] о существенной эффективности использования ВИГ-а в ветроэнергетике свидетельствуют и постановления международного тематического семинара «Винт изменяемой геометрии (ВИГ)», который был проведен в Тбилиси с 13-го по 15 июля 2011 года.

Несмотря на множество работ известных фирм, и ученых разных стран, проблема ВИГ еще не решена. Существуют патенты, но нашедшие реального воплощения, главным образом из-за сложности и недостаточной надежности технических решений.

Следует учесть, что все эти фирмы занимались изменением, какого-либо одного параметра, например, фирма «Сикорский» занималась изменением только диаметра винта, а корпорация «Боинг» - изменением только крутки лопастей.

Грузинский технический университет (ГТУ) предложил сочетание изменения диаметра и крутки во время эксплуатации.

По линии международного научно-технического центра (МНТЦ) группа специалистов ГТУ работала над проектом G-060-2 «Винт изменяемой геометрии (ВИГ) и средства его управления (узлы, приводящие в действие)», коллаборатором проекта был Лео Дадоне, руководитель многих опытно-конструк-

торских работ по вертолетостроению, старший научный сотрудник, руководитель группы конструкторов, корпорации «Боинг-Роторграфт» (США).

Первоначально на этапе анализа, на основе расчленения объекта исследования был спроектирован и изготовлен макет винта с изменяемым диаметром, потом макет винта с изменяемой круткой лопастей. После лабораторных испытаний их основных узлов на этапе синтеза был создан винт с одновременно изменяемыми диаметром и круткой лопастей, а также стенд для его испытания [4].

Проведенные стендовые испытания модели ВИГ показали, что при высоких числах оборотов возникают значительные центробежные силы, действующие на ходовой винт. Ходовой винт – самый нагруженный элемент конструкции несущего винта и является слабым звеном. Снижение вредного воздействия этих сил и стало весьма актуальной проблемой. Соответственно по линии МНТЦ группа специалистов ГТУ работала над проектом G-916 «Управляемый винт изменяемой геометрии с компенсацией действия центробежных сил». Коллабораторами были Жан – Жак Филипп старший научный сотрудник, почетный советник научного центра Франции «ОНЕРА», занимающегося исследованиями и разработками вертолетов и СВВП и господин Лео Дадоне.

Целью проекта G-916 была разработка системы компенсации центробежных сил. Технический подход состоял в проведении модельного эксперимента, в котором стенд стационарно закреплен на месте. При вращении винта в режиме вентилятора были осуществлены измерения тяги в зависимости от изменения частоты вращения и диаметра винта. Это имитирует условия режима висения летательного аппарата. Из возможных принципов компенсации (механического, электрического, гидравлического) был выбран гидравлический, как наиболее гибкий в управлении [5 - 8].

На конструкцию этого варианта ВИГ-а получен Европатент Application No/Patent No 08737551.5 - 2422 PCT/IB2008001041. В настоящее время патентуется в США. Все финансовые расходы патентования взял на себя Евросоюз.

Безопасность динамических испытаний ВИГ-а была обеспечена безотказностью узлов ВИГ с системой компенсации. Для оценки безотказности был сконструирован и изготовлен стенд статических испытаний, на котором были экспериментально имитированы нагрузки, действующие при различных частотах вращения винта. Были определены линии упругости лопасти в зависимости от имитируемых частот вращения при сдвинутой и раздвинутой лопасти, а также зависимости усилий на рычаге управления стендом от имитируемых частот вращения.

Эксперименты, на стенде динамических испытаний, были проведены методом замера скорости воздушного потока крыльчатым анемометром, который для данной задачи характеризовался достаточной повторяемостью результатов измерений.

Установлено, что в случае увеличения диаметра винта в 1,4 раза и изменения крутки лопасти в пределах $16\div 18^\circ$ обеспечивается повышение силы тяги примерно, в 1,6 раз.

Эффективность системы компенсации доказана многократным безотказным сдвижением-раздвижением лопасти винта во всем диапазоне изменения частот вращения. Это обусловило синхронность функционирования ВИГ-а.

Результаты работ по обоим проектам доложены и одобрены на авторитетных международных научно-технических конференциях, запатентованы и опубликованы в научных статьях. В Грузии и Румынии издана монография на русском и английском языках.

Коллабораторами проектов было предложено, что для дальнейшего увеличения эффективности использования ВИГ-а, целесообразно упрощение механизма изменения диаметра и увеличение диапазона изменения крутки лопастей до 30° .

Исполнителями проекта было предложено несколько конструктивных вариантов для решения этой задачи. МНТЦ на основании поддержки коллабораторов профинансировал это предложение.

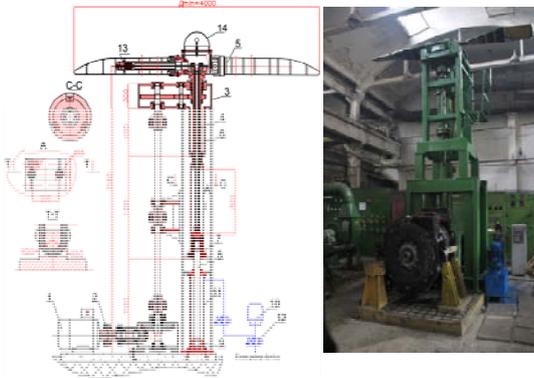


Рисунок 2 – Стенд динамических испытаний

Из предложенных конструктивных вариантов на основе консультации с коллабораторами, а также с другими компетентными специалистами работающих в области авиации, был выбран более оптимальный и в условиях Грузии наиболее реализуемый вариант. Сущность этого варианта заключается в том, что втулка и лопасти освобождены от всяких лишних деталей и уз-

лов и остался только трос, концы которого закреплены на движущихся частях лопастей. Сама лопасть, с целью свободного осуществления крутки, состоит из гибких элементов, которые закреплены между несущими нервюрами (Рис. 2).

При увеличении оборотов воздушного винта, за счет возникших центробежных сил, движущиеся части лопастей раздвигаются и диаметр винта увеличивается. Для уменьшения диаметра, поршень и шток гидроцилиндра перемещаются в нужном направлении и с помощью троса диаметр винта уменьшается.

При увеличении или уменьшении диаметра с помощью специальных механизмов каждая нервюра, в каждый момент, занимает заранее рассчитанное угловое положение вокруг неподвижного лонжерона, чем обеспечивается максимальная крутка лопастей при минимальном диаметре и наоборот, минимальная крутка при максимальном диаметре винта. Этими же механизмами крутки сохраняется стабильность формы лопастей при вращении винта т.е. при действии на лопасти значительных центробежных и подъемных сил.

На эту конструкцию получен Грузинский патент и готовятся документы для Европейского патента, на финансирование которого имеется согласие руководителей Евросоюза.

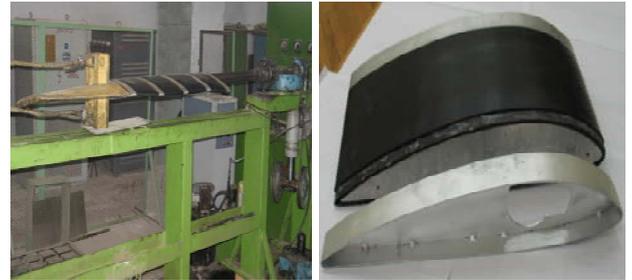


Рисунок 3 – Лопасть с гибкими элементами и нервюры

Проведен подробный анализ существующих литературных данных, осуществлены необходимые аэродинамические и прочностные расчеты, составлены технологические карты изготовления всех ответственных деталей, параллельно были изготовлены детали и узлы, осуществлена модернизация стендов для статических и динамических исследований соответственно новой конструкции винта, проведены предварительные испытания лопастей на

стенде статических испытаний и подготовлен стенд динамических испытаний для проведения подробных экспериментов (Рис. 3).

По разработанной методике в предыдущем проекте измерены скорость воздушных потоков в разных сечениях лопастей по схеме показанной на рис. 4 и с помощью известных зависимостей определены характер распределения подъемных сил вдоль лопастей при разных диаметрах ротора и величины крутки лопастей (рис. 5 и 6).



Рисунок 4 – Схема установки для измерения тяги винта на стенде путем замера скоростей с помощью анемометров. 1-Стенд ВИГ, 2-Анемометры, 3-Рама для установки анемометров.

Изучены также влияние угла установки лопасти на величину и характер распределения подъемной силы вдоль лопасти. Результаты некоторых экспериментов представлены на рисунках 7, 8, 9, 10.

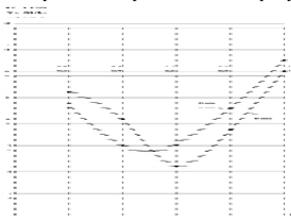


Рисунок 5 – Схема распределения индуктивных скоростей вдоль размаха лопасти для разных диаметров воздушного винта

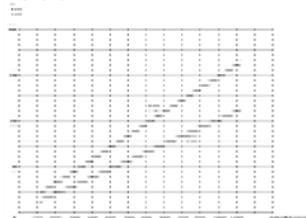


Рисунок 6 – Схема зависимости тяги ВИГ-а от частоты вращения винта для случая угла установки лопасти $\varphi_{0,75}=15^\circ$

В настоящее время проводятся конкретные расчеты эффективности использования разработанных конструкции для ветроэнергетических установок. Следует отметить, что результаты предварительных расчетов весьма оптимистически.

В таблице 1, как пример, показаны сравнительные данные эффективности ветростанций с регулируемым диаметром с стандартными станциями известной Германской фирмы «Энеркон» с постоянными диаметрами ротора 33м и 48м при изменении скорости ветра в диапазоне $3\div 32$ м/сек.

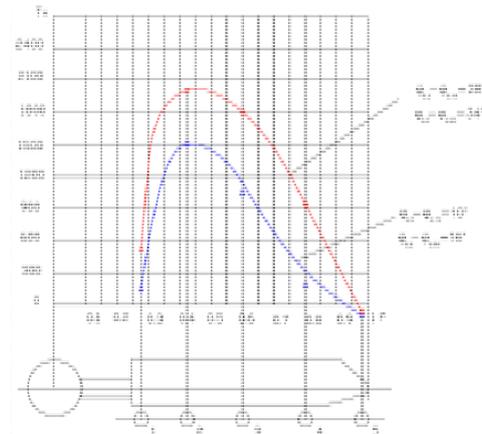


Рисунок 7 – График зависимости тяги ВИГ от изменения крутки лопастей для минимального диаметра D_{\min} винта, частоты вращения $n=3000$ об/мин и угла установки $\varphi = 5^\circ$.

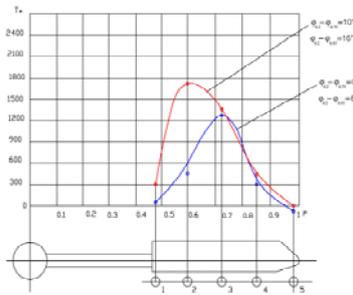


Рисунок 8 – График зависимости тяги ВИГ от изменения крутки лопастей для максимального диаметра D_{max} винта, частоте вращения $n=200$ об/мин и угла установки $\varphi = 5^\circ$.

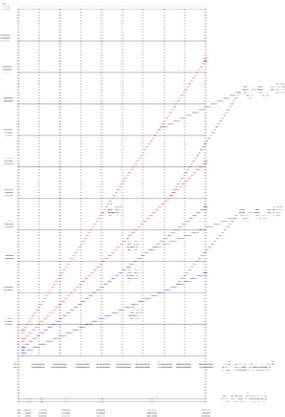


Рисунок 9 – График зависимости тяги ВИГ от частоты вращения винта, для минимального диаметра D_{min} .

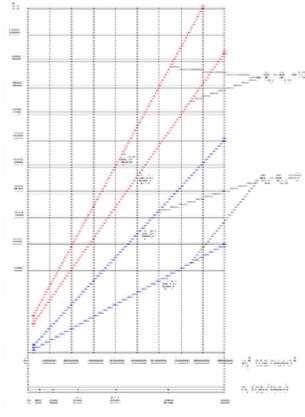


Рисунок 10 – График зависимости тяги ВИГ от частоты вращения винта, для максимального диаметра D_{max} .

Таблица 1 – Эффективность модернизированной ветровой станций D=33/48 по сравнению с стандартными станциями

Тип	E-33		E-33 Модерн.		Эффект	E-48		E-33/48		Эффект	
V м/с	Dm	PkW	Dm	PkW	kW	Dm	PkW	Dm	PkW	kW	+%
1	33	0.0	33	0.0	-	48	0.0	48	0.0	0.0	0
2	33	0.0	33	0.0	-	48	2.0	48	2.0	2.0	0
3	33	5.0	33	5.0	-	48	12.0	48	12.0	7.0	240
4	33	13.7	33	13.7	-	48	32.0	48	32.0	18.3	233
5	33	30.0	33	30.0	-	48	66.0	48	66.0	36.0	120
6	33	55.0	33	55.0	-	48	120.0	48	120.0	65.0	118
7	33	92.0	33	92.0	-	48	191.0	48	191.0	99	207
8	33	138.0	33	138.0	-	48	284.0	48	284.0	146	179
9	33	196.0	33	196.0	-	48	405	44	335.0	139	171
10	33	250.0	33	250.0	-	48	555	42	335.0	85	134
11	33	292.0	33	292.0	-	48	671	40	335.0	43	114
12	33	320.0	33	320.0	-	48	750	38	335.0	15	104
13	33	335.0	33	335.0	-	-	-	33	335.0	-	-
14	33	335.0	33	335.0	-	-	-	33	335.0	-	-
15	33	335.0	33	335.0	-	-	-	33	335.0	-	-
16	33	335.0	33	335.0	-	-	-	33	335.0	-	-
17	33	335.0	33	335.0	-	-	-	33	335.0	-	-
18	33	335.0	33	335.0	-	-	-	33	335.0	-	-
19	33	335.0	33	335.0	-	-	-	33	335.0	-	-
20	33	335.0	33	335.0	-	-	-	33	335.0	-	-
21	33	335.0	33	335.0	-	-	-	33	335.0	-	-
22	33	335.0	33	335.0	-	-	-	33	335.0	-	-
23	33	335.0	33	335.0	-	-	-	33	335.0	-	-
24	33	335.0	33	335.0	-	-	-	33	335.0	-	-
25	33	335.0	33	335.0	-	-	-	33	335.0	-	-
26	-	-	31,1	335,0	335,0	-	-	31,1	335,0	335,0	100
27	-	-	29,4	335,0	335,0	-	-	29,4	335,0	335,0	100
28	-	-	27,8	335,0	335,0	-	-	27,8	335,0	335,0	100
29	-	-	26,4	335,0	335,0	-	-	26,4	335,0	335,0	100
30	-	-	25,1	335,0	335,0	-	-	25,1	335,0	335,0	100
31	-	-	23,9	335,0	335,0	-	-	23,9	335,0	335,0	100
32	-	-	22,3	335,0	335,0	-	-	22,3	335,0	335,0	100
33	-	-	21,7	335,0	335,0	-	-	21,7	335,0	335,0	100
34	-	-	20,8	335,0	335,0	-	-	20,8	335,0	335,0	100

Из таблицы видно при каких скоростях какая ижидаемая эффективность новой станций до скорости 22 м/сек. А с выше этой скорости эффективность новой станций будет 100%, так как при этих скоростях существующие станций сегодня не в состояний работать.

Разработаны несколько вариантов конструкции роторов для ветровых станций с разными мощностями, некоторые из них находятся на стадии патентования.

Воздушные винты с изменяемыми геометрическими параметрами в динамике также эффективно можно использовать в таких отраслях техники как дирижаблестроение, производство гребных винтов для судостроения и другое.

Список использованных источников: 1. В.П.Харитонов. Автономные Ветроэлектрические Установки. 2006 г. М.: Государственное научное учреждение «Всероссийский НИИ Электрофикации сельского хозяйства (ГНУ ВИЭСХ)». 2006 г. – 280 стр. 2. Р.Я.Янсон. Ветроустановки. Москва. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2007 г. –20 стр. 3. Т.А.Шеммери. Wind Turbines. Publisher: BookBoon 2010. ISBN–13: 9788776816926. –Number of pages: 88. 4. V.Animitsa, V.Golovin, M.Krainov, V.Novak, N.Tarasov, V.Shecheglova. Experiment-Calculated Investigations of Fields of Inductive Velocities Behind the Rotor on Aerodynamic Characteristics of the Antitorque Rotor at Small Flight Speeds at Lateral Wind. TSAGI. Moscow. The 4th Forum of the Russian Helicopter Society. February, 2004. 5. R. Turmanidze, L. Dadone, G. Sanadze. Increase of Flight and Technical Characteristics of Flying Vehicles By Means of Application of the Variable Geometry Rotor. Materials of the 5th Forum of the Russian Helicopter Society. Moscow, 2002. p. VI39-VI48. 6. R.S. Turmanidze, L. Dadone, J.-J. Philippe, B. Demaret. Investigation, Development and Tests Results of the Variable Geometry Rotor. 33 rd European Rotorcraft Forum. Kazan, 10–14 September 2007, Pages 11. 7. Dadone L.; Liu J.; Acree C. Proprotor Design Issues for High Speed Tiltrotors. Boeing Defense & Space Group, Helicopter Division. NASA Ames Research Center. Presented at the 50 th Annual Forum of the American Helicopter Society, Washington, DC, May 1994. 8. J.C. Walchko, J. Kim, K. W. Wang, E.C. Smith. Hybrid Feed forward-Feedback Control for Active Helicopter Vibration Suppression. The Pennsylvania State University, University Park, PA 16802. AHS Forum Penn State Papers May 1-3, 2007.

Поступила в редакцию 15.05.2012

УДК 621.922.02.9

М. Н. Шейко, канд. техн. наук, И. В. Бондарь, канд. техн. наук, Киев, Украина

КИНЕТИКА ГИДРОАБРАЗИВНОГО ИЗНОСА СВЯЗКИ ОДНОСЛОЙНОГО АЛМАЗНОГО ПРАВЯЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С ПРОТЕКЦИЕЙ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

Досліджено знос нікелевої зв'язки одношарового алмазного правлячого інструменту на прикладі правлячих брусків, виготовлених методом гальванопластики, в процесі врізної правки абразивних кругів. Підтверджено закон гідроабразивного зносу, згідно з яким обсяг вимитої зв'язки, що дорівнює об'єму межзеренного простору робочого шару, із зростанням обсягу диспергованого матеріалу асимптотично наближається до граничного значення, що залежить від величини середньої товщини одного зрізу (опосередковано через подачу на глибину). Встановлено вплив іонно-плазмових покриттів робочої поверхні правлячого інструменту на швидкість процесу гідроабразивного зносу зв'язки. Показано, практичний ефект уповільнення зносу зв'язки спостерігався при її протекції іонно-плазмовими покриттями TiN / Co, а покриття TiC / Co виявилось не ефективним, ймовірно, в силу меншої адгезії до підкладки, що вимагає подальших досліджень.

Исследован износ никелевой связки однослойного алмазного правящего инструмента на примере правящих брусков, изготовленных методом гальванопластики, в процессе врезной правки абразивных кругов. Подтвержден закон гидроабразивного износа, согласно которому объем вымтой связки, равный объему межзеренного пространства рабочего слоя, с ростом объема диспергованого материала асимптотически приближается к предельному значению, зависящему от величины средней толщины одного среза (опосредовано через подачу на глубину). Установлено влияние ионно-плазменных покрытий рабочей поверхности правящего инструмента на скорость процесса гидроабразивного износа связки. Показано, практический эффект замедления износа связки наблюдался при ее протекции ионно-плазменными покрытиями TiN/Co, а покрытие TiC/Co оказалось не эффективным, вероятно, в силу меньшей адгезии к подложке, что требует дальнейших исследований.

Studied the wear-layer nickel-binding ruling diamond tool on the example of the ruling bars fabricated by electroforming, in the process of editing mortise abrasive wheels. Confirmed by the law hydroabrasive wear, according to which the volume of washed bundles of equal volume of intergranular space of the working layer, with an increase in the volume of the dispersed material asymptotically approaches the limiting value, which depends on the size of the average thickness of a single cut (mediated through the depth of flow.) The effect of ion-plasma coatings the working surface of the tool of the ruling on the rate of wear Waterjet ligament. We show the practical effect of slowing down wear and tear ligaments observed in the protection of its ion-plasma coating TiN / Co, and the coating TiC / Co was not effective, probably due to less adhesion to the substrate, which requires further research.

Одной из составляющих ресурсосберегающих и энергоэффективных технологий обработки резанием является врезные фасонное шлифование абразивными кругами с использованием прецизионного однослойного алмазного правящего инструмента – роликов и брусков. Одной из проблем повышения ресурса алмазного правящего инструмента, изготовленного методом гальванопластики, является надежное удержание алмазных зерен в никелевой связке, подвергаемой абразивному износу продуктами диспергирования ма-

териала шлифовальных кругов, и как следствие, – ослабляющему заделку алмаза в ней.

Решение проблемы неразрывно связано с задачей: 1) установления закономерностей выработки связки и образования карманов в межзеренном пространстве и 2) управления скоростью этого процесса.

Теория процесса правки с позиции абразивно-алмазной обработки построена в [1, 2], но многие вопросы требуют экспериментального изучения, так как немногочисленные опыты [3] носят поверхностный характер. В [4] выполнены исследования влияния покрытий на работоспособность, в основном, многослойных правящих инструментов. В работе [5] доказывается, что в процессе износа алмазного слоя однослойного правящего инструмента достигается динамическое равновесие между износом алмазов и вымыванием никелевой связки, а средний вылет зерен над связкой и объемы карманов в межзеренном пространстве стабилизируются на значительный период времени. В однослойном правящем инструменте износ рабочей поверхности происходит двумя путями: посредством абразивного износа алмазных зерен и посредством вырывания их из связки. Анализ характера износа рабочей поверхности алмазных правящих роликов и брусков показал: в ряде случаев второй механизм превалирует над первым. Это происходит за счет гидроабразивного вымывания связки вокруг зерна. Заделка зерна в связке уменьшается, прочность удержания ослабевает. Было показано, что величина, количественно характеризующая вымывание связки, и, как следствие, вылет зерна над связкой и прочность его удержания, – это удельный объем (на единицу площади рабочей поверхности) межзеренного пространства $\omega, \text{мм}^3/\text{мм}^2$. Эта величина стремится к своему пределу ω_{max} , зависящему от режимов резания, а скорость роста, кроме прочего, определяется твердостью связки в заделке зерна. Чем выше твердость, тем меньше величина ω , достигаемая за какой-то промежуток времени [6]. Была выдвинута гипотеза, согласно которой ионно-плазменное покрытие, повышая твердость и износостойкость поверхности никелевой связки, замедляет темпы гидроабразивного вымывания связки и, следовательно, темпы вырывания наиболее нагруженных и выступающих зерен. В этом состоит предполагаемый механизм уменьшения удельного износа алмазов.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния ионно-плазменных покрытий рабочей поверхности правящего инструмента (на примере алмазного бруска) на скорость процесса абразивного износа связки. Ставилась задача: установить закономерности выработки связки и образования карманов в межзеренном пространстве рабочей поверхности, защищенной ионно-плазменными покрытиями.

Экспериментальный правящий брусок (рис. 1) был изготовлен по особой технологии с осаждением толстого слоя никеля. Это позволило исключить необходимость укрепления оболочечной конструкции заливкой сплава Вуда,

температура плавления которого ниже технологической температуры нанесения ионно-плазменного покрытия. Брусок был, аналогично [6], изготовлен многородожечным. Это позволило нанести покрытие на две дорожки, а оставшиеся две оставить контрольными и с одной установки в единых условиях, на одинаковых режимах производить правку абразивных кругов и наблюдать за состоянием защищенной и не защищенной рабочей поверхностью.

Покрытие было нанесено на стадии, когда рабочая поверхность достаточно вскрыта. Таким образом, была защищена поверхность межзеренных карманов, что по нашим прогнозам должно замедлить темп дальнейшего расширения этих карманов. Покрытия (TiC/Co, мелкозернистое, толщина 15 мкм и TiN/Co, крупнозернистое, толщина 15 мкм, причем компенсирующие прослойки из кобальта предназначены для уменьшения внутренних напряжений на границе покрытие-подложка) наносили на модернизированной установке ВУ2МБС-М, которая оснащена двумя дуготронами, двумя нагревательными элементами и оптическим пирометром частичного излучения «Смотрич-7».



Рисунок 1 – Экспериментальный правящий брусок, изготовленный методом гальванопластики с осаждением толстого слоя никеля

Параметры рабочего слоя: AC125T 500/400. Правка производилась на плоскошлифовальном станке мод. 3E721BC, на столе которого устанавливался брусок. Режим правки: подача на глубину $t_0=0,001-0,010$ мм на ход стола, скорость стола $V_s=22,5$ м/мин, скорость управляемого круга $V_d=30$ м/с (средняя для $\varnothing 200 \dots 300$), отношение скоростей $|q|=80$. Правка проводилась с охлаждением 10%-ным содовым раствором, а абразивный материал управляемых кругов – 24A25CT2. Рабочая поверхность бруска (как защищенная, так и контрольная) исследовалась с периодичностью порядка 20000 циклов. Измерения объемов межзеренных карманов производилось по методике [5].

Результаты исследований отражены на обобщающем графике (рис. 2) изменения удельного объема межзеренного пространства с ростом объема диспергированного материала управляемых шлифовальных кругов на разных режимах правки и для различных состояний рабочей поверхности инст-

румента. Для наглядности объем измерялся в условных единицах (1 у.е. = 4524 мм³ на 1 мм ширины круга).

Оказалось, поверхность связки, защищенной ионно-плазменным покрытием TiC/Co, изнашивается с такой же скоростью, что и без покрытия. На это указывают участки кривых износа связки при диспергировании материала шлифовальных кругов в диапазоне объемов от 0 до 4 у. е. и от 4 у. е. до 8,3 у. е. (при подачах на глубину $t_0 = 0,001$ мм и $t_0 = 0,005$ мм соответственно). Каждый из участков экспериментальных кривых, построенных для случая нанесения покрытия, совпадает с участком, построенным для случая без покрытия (контрольной рабочей поверхностью).

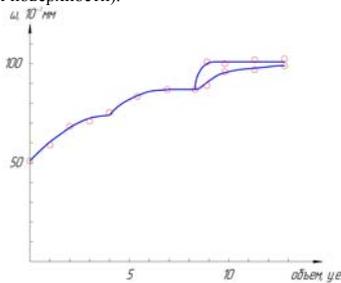


Рисунок 2 – Зависимость изменения удельного объема межзеренного пространства рабочей поверхности правящего инструмента от объема диспергированного материала управляемых шлифовальных кругов, обобщающая влияние протекции изнашиваемой связки правящего инструмента и режима правки. Точки – экспериментальные данные, кривые – теоретико-экспериментальные в соответствии с [5].

Визуальные исследования поверхности также указывало на это. Исходная рабочая поверхность инструмента после нанесения слоя TiC/Co (рис. 3, а) значительно отличается от контрольной, без покрытия, но после вскрытия (рис. 3, б) практически неотличима от контрольной (рис. 4, а). После диспергирования 4 у. е. объема шлифовальных кругов поверхность с покрытием (рис. 3, в) также ничем не отличается от контрольной на этом же этапе испытаний. Повторно нанесенное покрытие TiC/Co (рис. 3, г) также практически было сразу удалено при диспергировании 1,4 у. е. (рис. 3, д) и 2,9 у. е. (рис. 3, е) кругов на режимах правки с подачей $t_0 = 0,005$ мм. Соответствующие этим этапам испытаний контрольные рабочие поверхности показаны на рис. 4, б и рис. 4, в.

Иная картина наблюдалась при покрытии TiN/Co. На графике износа (рис. 2) в диапазоне от 8,3 у. е. до 12,8 у. е. двум ветвям соответствует износ связки, защищенной слоем TiN/Co (нижняя ветвь) и связки контрольной ра-

бочей поверхности (верхняя) на режимах правки с $t_0 = 0,010$ мм. Замедление темпов износа участка с покрытием в этом случае не вызывает сомнений.

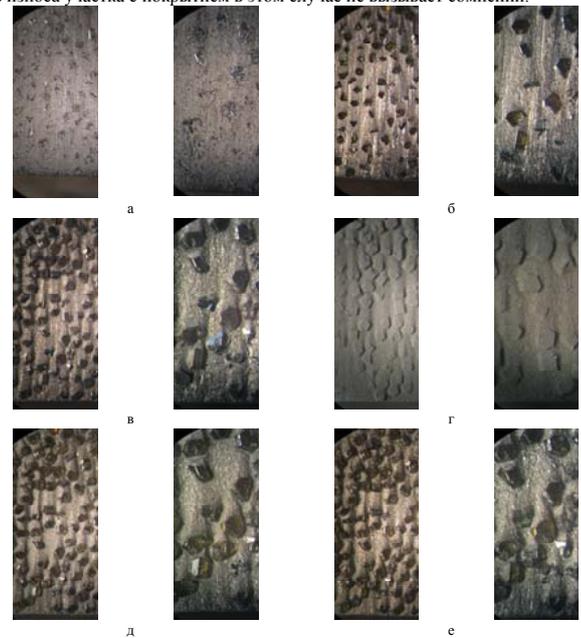


Рисунок 3 – Рабочая поверхность (при увеличениях, отличающихся вдвое) алмазного правящего инструмента, защищенная ионно-плазменным покрытием TiC/Co, на различных стадиях износа: а) исходная поверхность после нанесения TiC/Co; б) после вскрытия; в) после диспергирования 4 у. е. объема шлифовальных кругов на режиме правки с подачей на глубину $t_0 = 0,001$ мм и достижения предельного значения $\omega_{\text{max}} = 74 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{мм}^2$; г) после повторного нанесения TiC/Co; д) после диспергирования 2,9 у. е. объема шлифовальных кругов на режиме правки с подачей на глубину $t_0 = 0,005$ мм и достижения предельного значения $\omega_{\text{max}} = 87 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{мм}^2$.

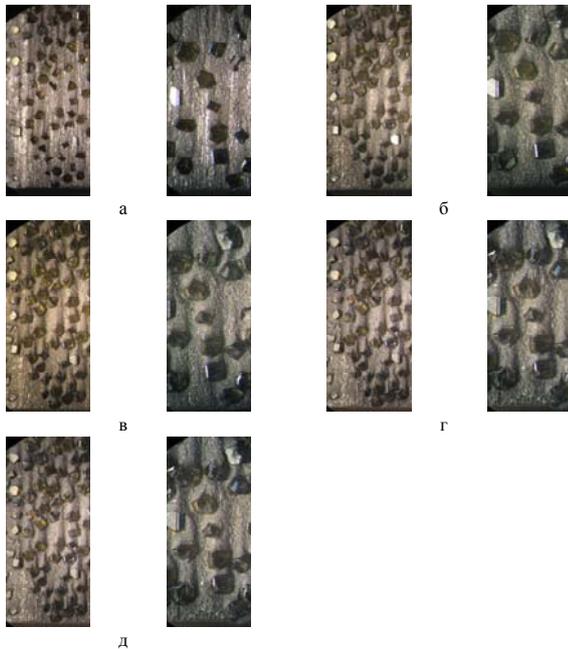


Рисунок 4 – Рабочая поверхность (при увеличениях, отличающихся вдвое) алмазного правящего инструмента без покрытия на различных стадиях износа: а) после вскрытия; б) после диспергирования 4 у. е. объема шлифовальных кругов на режиме правки с подачей на глубину $t_0 = 0,001$ мм и диспергирования 1,4 у. е. на режиме $t_0 = 0,005$ мм; в) при достижении предельного (для $t_0 = 0,005$ мм) значения $\omega_{\max} = 87 \cdot 10^{-3}$ мм; г) после дополнительного диспергирования 0,6 у. е. на режиме $t_0 = 0,010$ мм; д) после суммарного диспергирования 1,6 у. е. на режиме $t_0 = 0,010$ мм и достижения предельного значения $\omega_{\max} = 101 \cdot 10^{-3}$ мм.

321

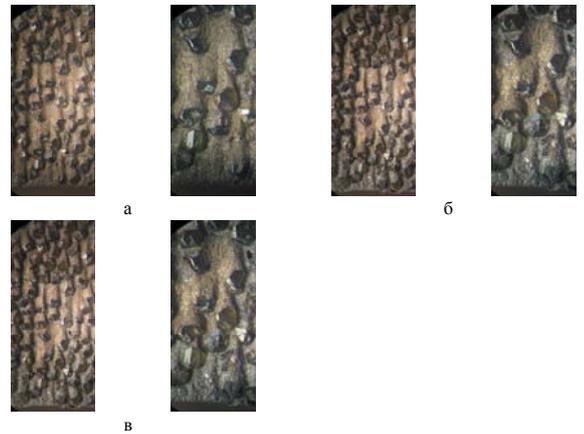


Рисунок 5 – Рабочая поверхность (при увеличениях, отличающихся вдвое) алмазного правящего инструмента, защищенная ионно-плазменным покрытием TiN/Co, на различных стадиях износа: а) после нанесения покрытия на поверхность с «карманами» $\omega = 87 \cdot 10^{-3}$ мм и вскрытия; б) после диспергирования 0,6 у. е. объема шлифовальных кругов на режиме правки с подачей на глубину $t_0 = 0,010$ мм; в) после суммарного диспергирования 1,6 у. е. на режиме $t_0 = 0,010$ мм и (предельное значение $\omega_{\max} = 101 \cdot 10^{-3}$ мм все еще не достигнуто).

Фотография рабочей поверхности после нанесения слоя TiN/Co и вскрытия (рис. 5, а) указывает на наличие TiN/Co с характерным цветом. После диспергирования 0,6 у. е. и 1,6 у. е. объема шлифовальных кругов (рис. 5, б и рис. 5, в соответственно) при $t_0 = 0,010$ мм карманы в межзеренном пространстве выглядят мельче, чем в случае контрольной рабочей поверхности на этих же этапах испытаний (рис. 4, г и рис. 4, д соответственно).

Второе, на что следует обратить внимание, каждому режиму правки соответствовала своя «полка» ω_{\max} : при $t_0 = 0,001$ мм $\omega_{\max} = 74 \cdot 10^{-3}$ мм, при $t_0 = 0,005$ мм $\omega_{\max} = 87 \cdot 10^{-3}$ мм и при $t_0 = 0,010$ мм $\omega_{\max} = 101 \cdot 10^{-3}$ мм (рис. 2).

322

Таким образом, полученные данные позволяют сделать следующие выводы:

1. Подтвержден закон гидроабразивного износа (вымывания) никелевой связки алмазного однослойного правящего инструмента, согласно которому объем вымытой связки, равный объему межзеренного пространства рабочего слоя, с ростом объема диспергированного материала асимптотически приближается к предельному значению, зависящему от величины средней толщины единичного среза (опосредовано через подачу на глубину).
2. Скорость стремления к предельному значению, т.е. время достижения установившегося режима, определяется соотношением твердости связки (либо покрытия) и диспергируемого абразивного круга.
3. Практический эффект замедления гидроабразивного износа связки наблюдался при ее протекции ионно-плазменным покрытием TiN/Co, а покрытие TiC/Co оказалось не эффективным, вероятно, в силу меньшей адгезии к подложке, что требует дальнейших исследований.

Список использованных источников: 1. Шейко М. Н. Врезная правка алмазными брусками в свете механико-статистических представлений об абразивно-алмазной обработке. Сообщение 1. Редукция к схеме обработки с непрерывной подачей на глубину / М. Н. Шейко, О. В. Химач // Сверхтвердые материалы. – 2004. – № 1. – С. 36–45. 2. Шейко М. Н. Врезная правка алмазными брусками в свете механико-статистических представлений об абразивно-алмазной обработке. Сообщение 2. Некоторые теоретические вопросы инструмента с неоднородной рабочей поверхностью / М. Н. Шейко, О. В. Химач // Сверхтвердые материалы. – 2004. – № 2. – С. 47–52. 3. Stevens C. Electroplated Diamond Dressing Blocks. // Proceeding of the International Industrial Diamond Conference, Chicago, 1969, p. 137-140. 4. Лавриненко В. И. Влияние ионно-плазменного покрытия на эксплуатационные свойства алмазного правящего инструмента / В. И. Лавриненко, М. Н. Шейко, Е. В. Дабига, И. В. Бондарь, П. И. Болотов, А. Г. Лубин // Сверхтвердые материалы. – 2008. – № 6. – С. 73–80. 5. Шейко М. Н. Эволюция рабочей поверхности алмазных брусков в процессе врезной правки / М. Н. Шейко, В. П. Пацкевич, В. М. Немец, В. Н. Скок // Сучасні процеси механічної обробки інструментами з НТМ та якість поверхні деталей машин: Зб. наук. праць – Київ: ІНМ НАН України, 2006. – с. 118-125. 6. Шейко М. Н. Эволюция рабочей поверхности алмазных правящих брусков на стадии, предшествующей ее разрушению / М. Н. Шейко, Д. Н. Бородавко, В. Н. Скок // Сверхтвердые материалы. – 2007. – № 2. – С. 65–72.

Поступила в редакцию 15.05.2012

323

УДК 621.9.031

Ч.Ф. Якубов, канд. техн. наук, С.Р. Меметов, Симферополь, Украина

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ И СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД

У статті досліджено можливість зміцнення контактних шарів швидкохідного інструмента в умовах мінімізованої витрати СОТС. Представлені експериментальні результати стійкості випробувань свердла при обробці нержавіючої сталі. Показано, що стійкість металорізального інструменту істотно залежить від початкових умов його експлуатації.

В статті досліджено можливість упрочнення контактних шарів швидкохідного інструмента в умовах мінімізованого витрати СОТС. Представлені експериментальні результати стійкості випробувань свердла при обробці нержавіючої сталі. Показано, що стійкість металорізального інструмента істотно залежить від початкових умов його експлуатації.

The article shows the possibility of contact layers strengthening of metal-cutting tools during the process of cutting in MQL conditions where lubricant. Experimental results stoykostynh test drill in the processing of stainless steel. It is shown that the resistance of cutting tools depends on the initial conditions of use.

Постановка проблемы. Проблема повышения работоспособности металлообрабатывающего инструмента продолжает оставаться одной из основных задач современной науки о резании, пути решения которой лежат в спектре динамично развивающихся технологий поверхностного упрочнения.

К общеизвестным способам повышения стойкости металлорежущего инструмента относится применение смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС), роль которых в процессах механической обработки достаточно глубоко изучена и широко освещена в литературе. Тем не менее, существующая практика эксплуатации СОТС при увеличении основных и вспомогательных расходов (транспортировка, хранение, утилизация и т.д.) в условиях современных производств значительно снижает рентабельность от их применения. Кроме того, подавляющее большинство базовых минеральных компонентов, входящих в состав повсеместно используемых в металлообрабатывающей промышленности СОТС, влекут за собой ощутимую техногенную нагрузку на окружающую среду и являются причиной роста ряда профессиональных заболеваний. В результате, на сегодняшний день обозначены тенденции перехода к эксплуатации экологически безвредных составов СОТС на основе растительных масел, относительно высокая стоимость которых компенсируется совершенствованием различных технологий их минимизированного расхода [1, 2].

Вместе с тем, за последнее десятилетие уже накоплен и отчасти систематизирован опыт украинских, российских и зарубежных ученых в области уп-

324

рочнения металлорежущего инструмента путем получения износостойких покрытий [3-5]. При этом совокупность физико-механических, теплофизических и трибологических свойств последних позволяет обеспечить высокоэффективное, экологически безвредное резание при полном отказе от применения СОТС. Однако, до сих пор не ясно, почему после разрушения износостойкого слоя благоприятное влияние покрытия с позиций стойкости режущего инструмента сохраняется.

Цель статьи. По аналогии с исследованием функциональных характеристик износостойких покрытий показать эффективность применения экологически безвредных технологических сред с позиций их упрочняющего действия.

Изложение основного материала. Известно, что подача в зону резания смазывающей среды ведет к уменьшению общей площади контакта на передней поверхности режущего инструмента, и как следствие – к росту удельных нормальных нагрузок [6]. Анализ полученных экспериментальных данных показал, что в условиях использования СОТС на основе растительных масел (с характерными для них более высокими проникающими, смазывающими, экранирующими и пассивирующими свойствами) данный эффект усиливается. В данном случае структурная приспособляемость рабочих поверхностей инструмента к внешним условиям нагружения наиболее полно протекает в начальном периоде резания. Этот процесс характерен для определенных условий и, по аналогии с приработкой трущихся пар, показывает существенное повышение стойкости на дальнейших (стационарных) режимах эксплуатации металлорежущего инструмента [7]. Период адаптации инструмента к внешним нагрузкам, как стадия перестройки структуры поверхностного слоя инструментального материала, есть неизбежное условие процесса контактного взаимодействия при резании. При этом основным механизмом выступает термодформационное упрочнение, сопровождаемое ростом плотности дислокаций в объемах, примыкающих к рабочим поверхностям инструмента.

Так, формирование износостойких контактных структур, предусматривает направленный поиск условий управления процессом изнашивания и, как следствие, стойкостью инструмента. Как уже отмечалось, результаты исследований показали, что применение СОТС вследствие уменьшения длины контакта по передней поверхности инструмента обуславливает значительный (от 30 до 80%) рост нормальных удельных контактных нагрузок, обеспечивая повышение износостойкости вторичных структур по закономерностям их деформационного упрочнения до 4-х раз, обнаруживая при этом корреляцию с изменением плотности дислокаций и субмикротвердостью контактных слоев. Схематическое изображение влияния нормальных и касательных напряжений на упрочнение контактных слоев инструмента представлено на рисунке 1 (H_{μ} – исходная микротвердость инструмента, $\Delta H_{\mu 1}$ – микротвердость в упругой зоне контакта, $\Delta H_{\mu 2}$ – микротвердость в пластической зоне кон-

такта при резании на воздухе, $\Delta H_{\mu 3}$ – микротвердость в пластической зоне контакта при резании с СОТС). Данная схема правомочна в диапазоне температур 200°C...400°C, при которых стимулируются процессы упрочнения быстрорежущей стали.

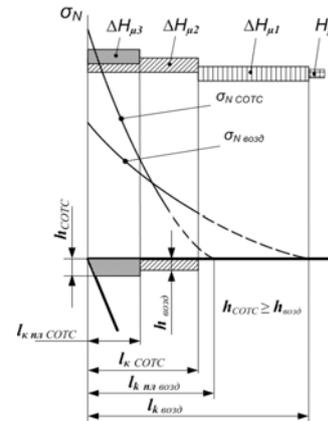


Рисунок 1 – Схема влияния нормальных и касательных напряжений на упрочнение контактных слоев инструмента

Исследование процессов резания инструментами из быстрорежущей стали, как в условиях подачи СОТС, так и при эксплуатации нанесенных износостойких покрытий в режиме «сухой» обработки обнаруживает некую аналогию в механизме их упрочняющего действия.

Данная постановка вопроса вытекает из следующих соображений:

1. Роль покрытий и СОТС в начальной стадии контактных процессов во многом совпадает, а именно: и те, и другие, снижая работу трения, уменьшают длину (площадь) контакта, обуславливая рост нормальных нагружающих напряжений.
2. Контактные слои инструмента могут находиться в диапазоне оптимальных температур упрочнения: в присутствии СОТС при резании в режиме приработки инструмента, при наличии покрытия за счет градиента температуры по ее глубине.

3. Вторичный (износостойкий) слой формируется на участке пластического контакта в начальном периоде работы инструмента за время, когда защитные функции покрытия практически исчерпываются, а СОТС в эту зону не проникает.

Вместе с тем известно, что износостойкие покрытия в диапазоне 10...20-ти минутного резания частично или полностью разрушается. Эффект же повышения стойкости выражается в значительно большем времени. В объяснении этого факта точки зрения исследователей расходятся. В одних работах [4] сохранение эффекта повышения стойкости и после разрушения покрытия объясняется положительным вкладом формируемой на границе покрытия с основой слоя двойного карбида вольфрама и кобальта Co_3W_2C (η - фаза). В других утверждается, что η - фаза не играет существенной роли в снижении износа и после удаления покрытия [8], либо даже снижает износостойкость пластины. Имеются так же гипотезы, связанные с предположением о сохранении локальных очагов покрытия или стекания участков покрытия на дно лунки [9, 10].

Выявление детального механизма этого технически важного явления продолжает оставаться актуальной научной проблемой. В общем же случае снижение интенсивности износа после разрушения покрытия, так или иначе, должно быть связано с трансформацией свойств материала инструмента. Роль покрытия в этом плане представляется следующим образом – при наличии покрытия материал инструмента претерпевает деформационное нагружение в условиях повышенных давлений и пониженных температур, вызванных снижением площади контакта, работы трения и наличием градиента температуры по толщине покрытия. Такую картину можно уподобить снижению скорости резания, в пределах соответствующему диапазону в режиме приработки, при которых в присутствии СОТС формируются упрочненные износостойкие структуры.

Правомочность такой аналогии подтверждается результатами экспериментальных исследований обработки нержавеющей стали 12X18H10T цилиндрическими спиральными сверлами марки Р6М5. Исходная стойкость инструмента была установлена путем резания инструментом без покрытия и без предварительной приработки на стационарных режимах «сухого резания» ($V_c = 27$ м/мин., $S_z = 0,05$ мм/зуб). На этих же режимах реализовывалось резание сверлом с износостойким покрытием TiN. Предварительная приработка инструмента без покрытия соответствовала шпалющим режимам резания ($V_c = 12,5$ м/мин., $S_z = 0,05$ мм/зуб) в условиях аэрозольного распыления СОТС специальным устройством Steidle L50/L60 (Германия) с последующим переходом в зону «сухого» резания на стационарных режимах обработки.

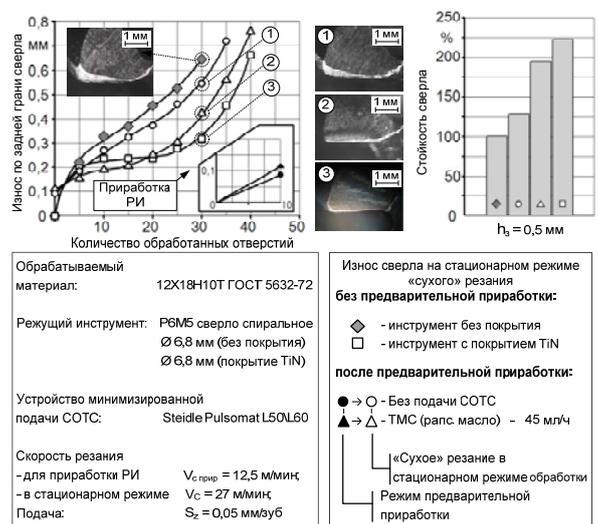


Рисунок 2 – Износ и стойкость спирального сверла Р6М5 при обработке нержавеющей стали 12X18H10T

Анализ полученных данных свидетельствует, что упрочнение резанием в среде рапсового масла методом предварительной приработки обнаружило эффект повышения стойкости и по количеству обработанных отверстий незначительно уступает сверлам с износостойкими покрытиями.

Естественно, полного соответствия свойств вторичных структур сформированных при резании в режиме приработки в присутствии СОТС и за «время жизни» износостойких покрытий, не должно быть. В первом случае формирование вторичных структур протекает в основном за счет деформационного упрочнения (СОТС в пластический контакт не проникает), во втором – сочетанием деформационных и диффузионных процессов, развиваемых элементами покрытия. Покрытие при развитии вторичных структур является активным источником легирующих элементов и стимулятором внутреннего субструктурного массопереноса, интенсивность которого определяется диффузионными процессами.

ІНФОРМАЦІЙНІ ДИЗАЙН-ТЕХНОЛОГІЇ ЯК ЗАСІБ ФОРМУВАННЯ ПРОФЕСІЙНИХ КОМПЕТЕНЦІЙ У МАЙБУТНІХ ІНЖЕНЕРІВ

Статтю присвячено обґрунтуванню доцільності та ефективності використання інформаційних дизайн-технологій як засобу формування професійних компетенцій у студентів.

Стаття посвячена обґрунтуванню цілесобразності і ефективності використання інформаційних дизайн-технологій як засобу формування професійних компетенцій у студентів.

The article is devoted to substantiation of expediency and efficiency of the use of information design - technologies as facilities of forming of designing competences of students.

Внедрение диффундирующего элемента из покрытия в инструментальную матрицу вносит дополнительное искажение в кристаллическое строение, которое, суммируясь с возрастающей плотностью дислокаций, изменяет параметры упрочненного слоя относительно формируемого в бездиффузионных условиях. Тем не менее, принципиальная общность механизмов формирования износостойких вторичных структур в поверхностных слоях инструмента при наличии покрытия и методом приработки в среде СОТС позволяют рассматривать покрытие как высокоэффективное (возможно идеальное) смазывающее средство.

Выводы.

Оценка смазочного действия СОТС как фактора, обуславливающего упрочнение контактных слоев инструмента в режиме приработки, открывает принципиально новые пути их эффективного использования: с одной стороны, с учетом применения техники минимальной смазки расширяет область внедрения в промышленность масел растительной природы, с другой – создает основу для синтеза приработочных масел для резания.

Имеется принципиальная общность в механизме формирования упрочненных износостойких структур в поверхностных слоях инструмента, как при наличии износостойкого покрытия, так и в условиях приработки инструмента в среде СОТС.

Список использованных источников: 1. *Weinert K.* Trockenbearbeitung und Minimalmengenschmierung / Einsatz in der spanenden Fertigungstechnik / Hrsg.: Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hongkong, London, Mailand, Paris, Singapur, Tokio: Springer-Verlag, 1998. 2. *Верещака А.С.* Анализ основных аспектов проблемы экологически безопасного резания / Верещака А. С., Лиерат Ф. и др. // Сб. резание и инструмент в технологических системах. Вып. 57. – Харьков, ХГПУ, 2000. С. 29 – 34. 3. *Костюк Г.И.* Методика выбора покрытий и режущих пластин с покрытиями на основе опыта Украины и международных фирм. Современные технологии в машиностроении: Сб. науч. статей / Под ред. А.И. Грабченко. - Том 1. - Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. - С. 371-401. 4. *Верещака А.С.* Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / Верещака А.С. – М.: Машиностроение, 1993. 336 с. 5. *Chubb I.P., Billenhen I.* Coated cutting tools a study of wear mechanisms in high speed machining / Chubb I.P., Billenhen I. – 2 «Wear», 2009. 6. *Энтеллис С.Г.* Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: Справочник / Под ред. С.Г. Энтеллиса, Э.М. Берлинера. – М.: Машиностроение, 1986. - 352 с., ил. 7. *Якубов Ч.Ф.* Упрочняющее действие СОТС при обработке металлов резанием. – Монография. Сімферополь: ОАО «Сімферопольская городская типография», 2008. – 156 с. 8. *Гуревич Д.М.* Изнашивание при точении твердосплавных пластин с износостойкими покрытиями / Гуревич Д.М. – Вестник машиностроения, 1989. - № 6. - С. 45 – 47. 9. *Schulz H.* Bedarfsgerechte Auswahl von PVD-Schichten zur Leistungssteigerung von HSS- und Hartmetallwerkzeugen / Spanende Fertigung, Herausgeber K. Weinert, Vulkan-Verlag, Essen 1994. С. 293-299. 10. *Peterson D., Sander H.* PVD-Verschleißschutzschichten. Morphologie, Struktur und tribologische Verhalten / Teil 1 Metalloberfläche 50 (1996) Nr.12. - С. 292-297.

Поступила в редакцию 15.06.2012

Инженерный дизайн – творческая деятельность, которая объединяет в процессе проектирования достижения различных областей человеческой деятельности – техники, инженерного конструирования, технологии, экономики, социологии, искусства, – и проявляется в специальной, социальной, особенной и индивидуальной компетенции будущего инженера.

Анализ последних исследований и публикаций. Анализ психолого-педагогической и специальной литературы переконус, что в творческой дизайнерской деятельности человека широкого использования получают компьютерные технологии, которые ставятся и задаются формированию дизайнерских компетенций у будущих инженеров трансформируются в информационный дизайн-технологии.

Основы теории и методики обучения дизайну изучали Л.Н. Безмоздин, Г.Т. Волкотруб, В.Л. Глазичев, Л.В. Загайкевич, М.С. Каган, Б.Е. Кочегаров, Г.Е. Левченко, Дж. Нельсон, Р.Ф. Рунге, С.Е. Саланкова, В.П. Тименко, Н.Е. Шпара и др.

Проблемы компьютеризации образования исследовали А.Т. Ашерев, Р. Вильямс, Р.С. Гуревич, Ю.О. Дорошенко, М.И. Жалдак, Ю.О. Жук, Ю.И. Машбиш, О.М. Торубара, О.Г. Яцюк и др.

Застосування сучасних комп'ютерних технічних засобів і програмного забезпечення відображено в наукових працях К.А. Гребенникова, Г.А. Кручина, Е.І. Кузнєцова, М.П. Лапчика, З.С. Сейдаметової, Н.Т. Тверезовської та ін.

Дизайнерські компетенції стають складовою частиною проектно-культурної майбутнього інженера, виконують інтеграційні функції і служать сполучною ланкою спеціальних знань і умінь, а також є універсальною, з навчально-методичного погляду, формою засвоєння естетики навколишнього простору.

Мета статті: Розкрити вплив інформаційних дизайн-технологій на формування дизайнерських компетенцій у студентів.

Вклад основного матеріалу. Інструментальними засобами формування дизайнерських компетенцій у майбутніх інженерів в контексті компетентнісного підходу в процесі дизайн-освіти, цілями якого є навчання, самовизначення, самоактуалізація, соціалізація і розвиток індивідуальності майбутнього фахівця виступають принципово нові освітні конструкції: компетентність і компетенції. Для того, щоб краще розкрити сенс інтегрованого поняття «дизайнерські компетенції» необхідно розділити його на два окремі поняття – «дизайн» і «компетенції».

Кочегаров Б.Е. формулює поняття дизайн як різні види проектувальної діяльності, що має на меті формування естетичних і функціональних якостей предметного середовища [1, с. 3].

Під компетентністю людини педагоги розуміють спеціально структуровані набори знань, умінь, навичок і стосунків, набуті у процесі нав-

чання, які дозволяють людині їх застосовувати, незалежно від ситуації та вирішувати проблеми, характерні для певної сфери діяльності [2, с. 19].

А.В. Хуторської розкриває поняття терміну «компетенція» – це готовність фахівця використовувати свої знання і уміння в житті, для вирішення практичних і теоретичних завдань [3, с. 134].

При вивченні проблеми дизайн-освіти ми виявили, що з впровадженням у освітню практику засобів нових інформаційних технологій з'явилася реальна можливість навчити майбутніх інженерів сучасній комп'ютерній графіці і на цій основі сформувати у них необхідні дизайнерські компетенції. Проте можливість інформаційних технологій у області дизайн-освіти поки що виявляються нерозкритими саме у зв'язку з недостатньою розробкою освітньої технології, призначеної для цієї мети. Результативність навчання залежить від особливості технології розробки комп'ютерних навчальних програм; від якості кожної інформаційної дизайн-технології; від наявності комплексного пакету педагогічних програмних засобів (ППЗ); від оптимального поєднання пакету ППЗ з методами традиційного навчання. У цьому контексті ми визначаємо інформаційну дизайн-технологію (ІДТ) як програмовий засіб навчального призначення, використовуваний студентом при досягненні навчального матеріалу відповідно до цілей і завдань дизайн-освіти.

Інформаційна дизайн-технологія (ІДТ) – це сукупність методів, засобів, операцій, які використовуються для проектування візуальних об'єктів. Вона безпосередньо пов'язана з комп'ютерними методами створення, обробки, редагування, імпорту, експорту, запису, відображення, передачі і друку інформації (креслення, графіки, фотографії, тексту) [4, с.25]. Стосовно цілей і завдань дизайнерської діяльності комп'ютерні технології трансформуються у інформаційну дизайн-технологію, засновану на використанні сучасної комп'ютерної техніки і програмного забезпечення, які дозволяють позбавити людину трудомісткого процесу «паперового макетування» візуальних об'єктів.

Ядром інформаційної дизайн-технології є комп'ютерна графіка, що включає сукупність електронних засобів, спеціальних методів і прийомів, використовуваних для створення, редагування і відтворення інформаційних повідомлень [4, с.45]. З технічної точки зору комп'ютерна графіка – це технологія введення, виводу, відображення, перетворення і редагування графічних об'єктів під управлінням комп'ютера [5, с. 15].

На нашу думку, комп'ютерна графіка – це потужний інструмент, що дозволяє за допомогою комп'ютерного моделювання і проектування формувати у студентів необхідні знання і пізнавальні прийоми, а також розвивати мотивацію навчальної діяльності, що буде сприяти розвитку компонентів дизайнерських компетенцій. Застосування графічних редакторів і пакетів програм сприяє естетичному вихованню студентів, оскільки вони наділені великою мірою наочності, формують просторову уяву, підводять до інтуїтивного

розуміння суті геометричних перетворень. При цьому комп'ютер полегшує кожному студентові самостійно досягати результату, який при традиційному навчанні нерідко пропонувався педагогом у готовому вигляді [5, с. 16-19]. Використання комп'ютерної графіки як основи інформаційної дизайн-технології у процесі формування дизайнерських компетенцій дає можливість по-новому організувати і сам навчальний процес. Технологічна компонента навчання комп'ютерній графіці має ряд особливостей. Застосування технологічних можливостей нових засобів комп'ютерної графіки підвищують творчий потенціал і творчі запити, спонукають до творчих розробок і експериментування, розширюють відчуття можливого.

При формуванні дидактичних вимог до інформаційних дизайн-технологій (ІДТ) варто, передусім орієнтуватися на принципи навчання, зміст яких базується на сучасних теоретичних досягненнях в області педагогіки і психології, що і дозволяє використовувати їх як систему дидактичних вимог.

1. Принцип науковості формулює цілий ряд вимог до ІДТ:
 - ІДТ доцільно наповнювати таким змістом, який найефективніше може бути засвоєний тільки за допомогою комп'ютера;
 - засоби засвоєння навчального матеріалу, передбачені ІДТ, мають відповідати сучасним науковим методам пізнання і динамічно змінюватися, що забезпечить швидке переналаштування програмного продукту відповідно до вимог.

2. Найбільш важливою вимогою, що ґрунтується на сучасному розумінні принципу наочності, полягає в тому, що за допомогою інформаційних дизайн-технологій потрібно не лише відзначити об'єкт вивчення, але і організувати діяльність навчаючихся.

3. На основі діяльнісного підходу слід переглянути принцип систематичності і послідовності. Ці методи можуть бути найоптимальніше реалізовані за допомогою графічних пакетів таким чином:

- в об'єктах або явищах, що представляються за допомогою комп'ютерних програм, мають бути виділені основні структурні елементи та істотні зв'язки між ними, що дозволяють представляти цей об'єкт у вигляді цілісного утворення;

4. Принцип активності декларує, що зміст діяльності, що організовується за допомогою інформаційних дизайн-технологій, повинен відповідати знанням що засвоюються. Оскільки активність обумовлена свідомістю, при роботі з інформаційними дизайн-технологіями навчальних програм необхідно орієнтуватися на наступні вимоги: доцільно в структуру навчання вводити орієнтовний компонент, який повинен включати два види знань, – знання з дизайн-діяльності, що реалізовується за допомогою комп'ютерної програми (мета діяльності, її предмет, засоби і основні етапи здійснення), і предметні знання, необхідні для успішної роботи з інформаційними дизайн-технологіями (правила, довідково-інформаційні дані і так далі). Таким чином,

застосовуючи інформаційні дизайн-технології при підготовці майбутніх інженерів, можна створювати нові комп'ютерні навчальні комплекси у різноманітних предметних областях, прикметною особливістю яких будуть наступні якості:

- інструментальне середовище, що легко модифікується;
- гнучкий предметно-орієнтований інтерфейс користувача;
- єдиний стиль надання інформації;
- можливість праці в інформаційних дизайн-технологіях без участі професійних програмістів;
- скорочення термінів засвоєння предметних циклів;
- забезпечення адаптивного характеру процесу навчання.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Таким чином, проведені дослідження можливості застосування інформаційних дизайн-технологій, ядром яких є комп'ютерна графіка, як основного засобу формування дизайнерських компетенцій у майбутніх інженерів дозволили зробити наступні висновки:

- інформаційні дизайн-технології, будучи синтетичною областю, інтегрують в собі знання, технологію і естетику малюнка, графіки з комп'ютерними технологіями, тому при навчанні інформаційним дизайн-технологіям важливо поставити акцент на синтезі і взаємозбагаченні мистецтва, дизайну і техніки.
- необхідно підносити студентам інформаційні дизайн-технології як засіб і знаряддя творчості, як потужний прикладний інструмент – інструмент створення об'єктів дизайну, а не тільки як об'єкт вивчення.
- використовувати технологію комп'ютерного проектування як базу для освоєння нових інформаційних дизайн-технологій і глибокої взаємодії з комп'ютером у процесі майбутньої професійної діяльності інженера. Потрібно навчити майбутнього інженера ставити творчі і прикладні завдання і вирішувати їх, не зупиняючись на рівні опанування інструментарію графічних пакетів.

Список використаних джерел: 1. Кочегаров Б.Е. Промисловий дизайн: / Б.Е. Кочегаров // Навч. посібник. – Владивосток: Вид-во ДВГТУ, 2006. – 297 с. 2. Тархан Л.З. Дидактична компетентність інженера-педагога: теоретичні і методичні аспекти: / Л.З. Тархан, // Монографія. – Сімферополь: КРІП Видавництво «Кримнавчедвид», 2008. – 424 с. 3. Хуторської А.В. Дидактична евристика. Теорія і технологія креативного навчання / А.В. Хуторської – М.: Вид-во МГУ, 2003. – 416 с. 4. Курунін В.Д. Графічний дизайн і реклама / В.Д. Курунін / – М.: ДМК Прес. 2001. – 272с. 5. Гребенніков К.А. Комп'ютерна графіка як засіб професійної підготовки фахівців-дизайнерів (на матеріалах середньої професійної освіти): дис.канд. пед. наук: 13.00.08 / К.А. Гребенніков. – М.: РГБ, 2003. – 147с.

Поступила в редакцію 15.06.2012

СОДЕРЖАНИЕ

Адаскин А.М., Верещака А.С., Верещака А.А., Каширцев В.В., Хожяев О.О., Крючков К.В. Исследование влияния содержания рения в Co-Re сплавке на режущие свойства твердых сплавов	3
Антонюк В.С., Бондаренко М.А., Рудь М.П., Яценко І.В. Особенности формирования тонких алмазоподобных наноструктур на режущем инструменте термическим осаждением в вакууме	13
Бажал А.И., Кучеровский В.М., Барак А.М., Бажал А.А., Бажал Ант.А., Серебренникова С.Г. Теоретические основы волновых технологий и опыт их применения для управления свойствами твердых структур	20
Бажал А.И., Кучеровский В.М., Барак А.М., Бажал А.А., Бажал Ант.А., Серебренникова С.Г. Волны и техногенная дилатантная проницаемость твердых структур	28
Верещака А.А. Слоистый композиционный инструментальный материал с нано-дисперсным покрытием	34
Вислоух С.П. Моделирование и прогнозирование технологических параметров методами искусственных нейронных сетей	45
Витязев Ю.Б., Грабченко А.И. Разработка рекомендаций по определению срока выполнения проектов изготовления изделий с использованием технологий SLA и SLS	53
Гончаров В.Д., Яковлев В.И., Ситников А.А., Собачкин А.В., Сейдуров М.Н. Исследование структуры и свойств покрытий, полученных методом электродуговой наплавки порошковым электродом из наноструктурированных СВС-механокомпозитов	65
Грабченко А.И., Фадеев В.А. О системах микро- и нанорезания	75
Деревяченко А.Г., Бабилунга О.Ю., Соценко А.О., Долинский А.О. Новый подход к распознаванию состояний контактных поверхностей работоспособных и отказавших инструментов	80
Джусурия Т.Г., Новак А.А. Повышение точности автоматизированного контроля размерного износа расточного инструмента одностороннего резания	88
Доброскок В.Л., Абдурайимов Л.Н., Витязев Ю.Б. Оценка степени сложности поверхностей промышленных изделий на основе анализа их триангуляционных моделей	94
Еремин Е.Н., Незров Д.А., Губин Д.С. Применение ультразвукового прессования в технологии производства подшипников скольжения	108
Еремин Е.Н., Шалай В.В., Филиппов Ю.О., Сумленов В.К. Применение модифицирования при электрошлаковой сварке жаропрочных сплавов	115

Калиниченко Н.Ю., Маркович С.Е., Калиниченко С.А. Анализ и классификация современных СОТС и наноматериалов, используемых в процессах абразивной обработки и рекомендации по их применению в технологии планетарного шлифования	121
Ким В.А., Белова И.В., Попкова А.А., Евдокимова Р.В. Кинетика структурных превращений при отпуске закаленной стали 15XSM	130
Кононенко И.В., Колесник М.Э. Модель и метод максимизации прибыли в процессе оптимизации содержания проекта	139
Кривошей А.В., Рыбак В.Я., Микищенко А.А., Мельник В.Е., Коробко В.Р., Надейн В.С. Анализ формообразования изношенных крупногабаритных цилиндрических зубчатых колес	145
Крыженый Г.К. Взаимосвязь двух циклов жизни и ее влияние на качество продукции	153
Кузнецов В.А., Заболотная И.В., Смирнов А.В., Юшин Д.И., Хомякова Н.В., Владыка А.А. Применение системного анализа и структурного синтеза методов изготовления деталей (МИД) для достижения принципиально нового уровня конкурентоспособности изделий	161
Куликов М.Ю., Иноземцев В.Е., Мо Наинг У. Способ улучшения качества поверхностного слоя с помощью комбинированной механоэлектрохимической обработки	168
Лавриненко С.Н. Влияние инструментального материала и геометрических параметров режущего инструмента на качество бионженерных изделий из полимеров	171
Ламнуэр Н.Ю. Распределение размеров изготовления изделий	177
Лебедев В.Я., Кузей А.М. Работоспособность алмазных кругов с водорастворимым наполнителем при обработке стеклоизделий	182
Левченко Р.В., Драгобецкий В.В., Пузырь Р.Г. Применение методов расчета теории оболочек при профилировании заготовок для ободьев колес	194
Липка В.М., Рапацкий Ю.Л. Повышение надежности резьбовых соединений при сборке автомобильных силовых агрегатов	199
Логоминов В.А., Гермашев А.И., Кришталь В.А., Внуков Ю.Н. О характеристике жесткости для тонкостенной детали типа «защелоченной пластины»	211
Лунарски Е. Стандартное управление инновациями и экоиновациями	218
Манохин А.С., Клименко С.А., Криворучко Д.В., Рыжов Ю.Э., Найдено А.Г. Компьютерное моделирование состояния поверхностного слоя деталей металлооптики, обработанных алмазным микроточением	230

<i>Мигранов М.Ш.</i> Трибологические свойства режущего инструмента с ионномодифицированным слоем и износостойким покрытием	240
<i>Мовшович А.Я., Ищенко Г.И., Черная Ю.А., Бондарь О.В.</i> Исследование деформированного состояния базовых плит универсально-сборных приспособлений для сварочных работ и выбор рациональной схемы их опирания и закрепления	247
<i>Набока Е.В.</i> Анализ функционирования системы качества изготовления деталей	252
<i>Огородник А.О., Хавин В.Л.</i> Механическая модель на основе нейронной сети для прогнозирования состояния металла при высокоскоростной лезвийной обработке	257
<i>Ревенко Д.В., Троценко В.В., Сопин П.К.</i> Управление съемом припуска при алмазно-эрозионно-электрохимическом шлифовании прецизионных поверхностей	265
<i>Смоловик Р.Ф.</i> Анализ и исследование социального аспекта сущности понятия инновационности процессов, технологий	271
<i>Стрельчук Р.М., Джуха Ш.К.</i> Исследование и анализ производительности обработки при шлифовании наноструктурных твердых сплавов	275
<i>Тарасюк А.П.</i> Влияние качества поверхностного слоя волокнистых полимерных композитов после механической обработки на их эксплуатационные свойства	281
<i>Тихоненко В.В., Шкилько А.М.</i> Изнашивание поверхностного слоя, упрочненного методом микродугового оксидирования	291
<i>Тринева Т.Л., Гуцаленко Ю.Г., Балака Е.В.</i> Современная оптимизация ускоренного изготовления сложной модельной оснастки	298
<i>Турманидзе Р.С.</i> Роторы с изменяемыми параметрами в динамике для крупных ветровых станций	306
<i>Шейко М.Н., Бондарь И.В.</i> Кинетика гидроабразивного износа связки однослойного алмазного правящего инструмента с протекцией ионно-плазменными покрытиями	316
<i>Якубов Ч.Ф., Меметов С.Р.</i> Сравнительный анализ эффективности применения износостойких покрытий и смазочно-охлаждающих технологических сред	324
<i>Якубов Ф.Я., Сулейманов Р.И.</i> Информационные дизайн-технологии как способ формирования профессиональных компетенций у будущих инженеров	330

Наукове видання

Високі технології в машинобудуванні

Збірник наукових праць

Упорядник проф. Грабченко А. І.

Оригінал-макет Балака О. В.

В авторській редакції

Підп. до друку 17.07.2012 р. Формат 60x84 1/16. Папір Copy Paper.
Друк - ризографія. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 10,0.
Облік. вид. арк. 11,0. Наклад 300 прим. 1-й завод 1-100. Зам. №
Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ»
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 116 від 10.07.2000 р.
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Друкарня ДП ХМЗ "ФЕД", 61023, Харків, вул. Сумська, 132