

ISSN 2079-004X

40'2015



ВІСНИК

Національного технічного університету
«ХПІ»

40(1149)'2015

Харків

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»

Серія: Технології в машинобудуванні

№ 40 (1149) 2015

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків
НТУ «ХПІ», 2015

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2015. – № 40 (1149). – 128 с.

Державне видання

**Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України
КВ № 5256 від 2 липня 2001 року**

Збірник виходить українською та російською мовами.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ» внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого наказом МОН України від 21.12.2015 № 1328 «Про затвердження рішень Атестаційної колегії Міністерства щодо діяльності спеціалізованих вчених рад від 15 грудня 2015 року»

Координаційна рада:

Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф. (**голова**);
К. О. ГОРБУНОВ, канд. техн. наук, доц. (**секретар**);
А. П. МАРЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; Є. І. СОКОЛ, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України;
Є. Є. АЛЕКСАНДРОВ, д-р техн. наук, проф.; А. В. БОЙКО, д-р техн. наук, проф.;
Ф. Ф. ГЛАДКИЙ, д-р техн. наук, проф.; М. Д. ГОДЛЕВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.;
А. І. ГРАБЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; В. Г. ДАНЬКО, д-р техн. наук, проф.;
В. Д. ДМИТРИЄНКО, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. ДОМНІН, д-р техн. наук, проф.;
В. В. СПІФАНОВ, канд. техн. наук, проф.; Ю. І. ЗАЙЦЕВ, канд. техн. наук, проф.;
П. О. КАЧАНОВ, д-р техн. наук, проф.; В. Б. КЛЕПІКОВ, д-р техн. наук, проф.;
С. І. КОНДРАШОВ, д-р техн. наук, проф.; М. А. ТКАЧУК, д-р техн. наук, проф.;
В. І. КРАВЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; Г. В. ЛІСАЧУК, д-р техн. наук, проф.;
О. К. МОРАЧКОВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.; В. І. НІКОЛАЄНКО, канд. іст. наук, проф.;
П. Г. ПЕРЕРВА, д-р екон. наук, проф.; В. А. ПУЛЯЄВ, д-р техн. наук, проф.;
М. І. РИЩЕНКО, д-р техн. наук, проф.; В. Б. САМОРОДОВ, д-р техн. наук, проф.;
Г. М. СУЧКОВ, д-р техн. наук, проф.; Ю. В. ТИМОФІЄВ, д-р техн. наук, проф..

Редакційна колегія серії:

Відповідальний редактор: Ю.В. Тимофієв, д-р техн. наук, проф.

Заст. відповідального редактора: О. О. Ключко, д-р техн. наук, проф.

Відповідальний секретар: Є. В. Басова, канд. техн. наук, доц.

Члени редколегії: С.С. Добротворський, д-р техн. наук, проф.; О.А. Мельніченко, д-р техн. наук, проф.; О.Я. Мовшович, д-р техн. наук, проф.; О.А. Пермяков, д-р техн. наук, проф.; Ю.А. Сизий, д-р техн. наук, проф.; Д.В. Сталінський, д-р техн. наук.; М.С. Степанов, д-р техн. наук, проф.; В.А. Фадєєв, д-р техн. наук, проф.; В.Д. Хіцан, д-р техн. наук, проф.; О.М. Шелковий, д-р техн. наук, проф.

*У квітні 2013 р. Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія «Технології в машинобудуванні», включений у довідник періодичних видань бази даних **Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)**.*

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».
Протокол № 11 від 25 «грудня» 2015р.

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY
«KHARKIV POLYTECHNIC INSTITUTE»

BULLETIN
OF THE NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY
«KHARKIV POLYTECHNIC INSTITUTE»

Series: «Technologies in mechanical engineering»

№ 40 (1149) 2015

Collected Works

The publication was founded in 1961

Kharkov
NTU «KhPI»

Collected Works. Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2015. – № 40 (1149). – 128 c.

State edition

Certificate of State Committee of Ukraine for Information Policy KB № 5256 from July 2, 2001

The collection is published in Ukrainian and Russian.

Bulletin of National Technical University «KhPI» included in the «List of scientific professional editions of Ukraine, which can be published results of dissertations for the degree of doctor and candidate of sciences», approved by order of the (MES of Ukraine) of 21.12. 2015 № 1328 «On approval decisions Certifying Board of the Ministry for academic councils of 28 December 2015»

Coordinating Board:

L. L. Tovazhnyansky, Dr. Tech. Sci., Prof. (**chief**);
K. A. Gorbunov, PhD. Tech. Sci., Docent. (**secretary**);
A. P. Marchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; Ie.I. Sokol, member NAS of Ukraine, Dr. Tech. Sci., Prof.;
Ie. Ie. Aleksandrov, Dr. Tech. Sci., Prof.; A. V. Boiko, Dr. Tech. Sci., Prof.;
F. F. Hladkyi, Dr. Tech. Sci., Prof.; M. D. Hodlevskyi, Dr. Tech. Sci., Prof.;
A. I. Hrabchenko, Dr. Tech. Sci., Prof. V. H. Danko, Dr. Tech. Sci., Prof.;
V. D. Dmytryienko, Dr. Tech. Sci., Prof.; I. F. Domnin, Dr. Tech. Sci., Prof.;
V. V. Yepifanov, PhD. Tech. Sci., Prof.; Iu. I. Zaitsev Dr. Tech. Sci., Prof.;
P. O. Kachanov, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. B. Klepikov, Dr. Tech. Sci., Prof.;
S. I. Kondrashov, Dr. Tech. Sci., Prof.; M. A. Tkachuk Dr. Tech. Sci., Prof.;
V. I. Kravchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; H. V. Lisachuk, Dr. Tech. Sci., Prof.;
O. K. Morachkovskyi, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. I. Nikolaienko, Dr. Tech. Sci., Prof.;
P. H. Pererva, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. A. Puliaiev, Dr. Tech. Sci., Prof.;
M. I. Ryshchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. B. Samorodov, Dr. Tech. Sci., Prof.;
H. M. Suchkov, Dr. Tech. Sci., Prof.; Iu. V. Tymofeev Dr. Tech. Sci., Prof.

Editorial Board:

Editor: Iu.V. Tymofeev, Dr. Tech. Sci., Prof.

Deputy editor: A. A. Klochko, Dr. Tech. Sci., Prof.

Secretary: Ie. V. Basova, PhD. Tech. Sci., Docent.

Members of the editorial board: S.S. Dobrotvorskyi, Dr. Tech. Sci., Prof.; O.A. Melnichenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; A.Ia. Movshovych, Dr. Tech. Sci., Prof.; A.A. Permiakov, Dr. Tech. Sci., Prof.; Iu.A. Syzyi, Dr. Tech. Sci., Prof.; D.V. Stalinskyi, Dr. Tech. Sci.; M.S. Stepanov, Dr. Tech. Sci., Prof.; V.A. Fadieiev, Dr. Tech. Sci., Prof.; V.D. Khitsan Dr. Tech. Sci., Prof.; A.N. Shelkovyi, Dr. Tech. Sci., Prof.

*In April 2013 Bulletin of National Technical University «KhPI» series «Technologies in mechanical engineering» included in the directory database of periodicals **Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)**.*

Recommended for publication by the Academic Council of NTU «KhPI».
Protocol No 11 of December 25, 2015

УДК.865.6

*Г.И. КОСТЮК***ПОЛУЧЕНИЕ НАНО- И СУБМИКРОСТРУКТУР ПРИ ДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА РИ ИЗ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ**

Экспериментально определен размер зерна с помощью растровой микроскопии (РЭМ-106), а также проведено теоретическое исследование объема и размера зерна наноструктур при действии ионизирующего облучения на режущий инструмент (РИ) из твердых сплавов Т15К6, ТН20, минералокерамики, Эльбор-Р, сравнение результатов которых с экспериментом по величине размера зерна позволяет говорить об адекватности теоретической модели определения размера зерна.

Ключевые слова: размер зерна, растровая электронная микроскопия, лазерное излучение, объем нанокластера.

Введение. Повышение работоспособности и эффективности требует снижения размера зерна, что приводит к повышению микротвердости, а значит – к росту износостойкости РИ к абразивному износу [1, 2]. При этом снижается модуль упругости, а значит и повышается стойкость к ударным нагрузкам, что особенно важно для черновой обработки [3, 4]. Поэтому реализация на поверхности РИ наноструктур и субмикроструктур может обеспечить высокую работоспособность и эффективность РИ. Одним из способов получения наноструктур является лазерная (ионизирующая) обработка режущего инструмента.

Всё это позволяет существенно улучшить служебные характеристики РИ и обеспечить их длительную и надежную работу.

Работа выполнена в рамках программы Министерства образования и науки Украины «Новые и ресурсосберегающие технологии в энергетике, промышленности и агропромышленном комплексе» (подсекция 13 «Аэрокосмическая техника и транспорт») и по темам: «Создание физико-технических основ повышения качества материалов аэрокосмических конструкций» и «Разработка технологических основ интегрированных технологий плазменно-ионной обработки деталей аэрокосмической техники» (подсекция 6 «Физико-технические проблемы материаловедения»), «Концепция создания наноструктур, нано- и традиционных покрытий с учетом влияния адгезии на эффективность и работоспособность деталей АТ, АД и РИ», «Экспериментально-теоретическое исследование получения наноструктур при действии ионных и светолучевых потоков на конструкционные материалы и РИ», хозяйственных работ и договоров о сотрудничестве.

Анализ последних исследований и литературы. В настоящее время значительное количество работ посвящено исследованию различных видов упрочнений на РИ и их эффективность, но вопрос о влиянии размера зерна на работоспособность РИ практически не исследовался, за исключением ряда наших работ [1–4]. В теоретических работах [1, 2] показана возможность теоретического прогноза размера зерна, а в работах [1–18] обобщены результаты исследований влияния наноструктур на физико-механические характеристики материалов, где также рассматриваются и материалы режущих инструментов, но в то же время, значительное количество работ

посвящены эффективности РИ [19–23], где не обозначено, какая структура материалопокрываний и основного материала РИ была исследована. Всё это говорит о необходимости комплексного экспериментально-теоретического исследования получения нано- и субмикроструктурных поверхностных слоев на РИ, что позволит оценить адекватность ранее предложенных моделей, выявить вероятность получения нано- и субмикроструктурных слоев при действии лазерного излучения на конструкционные материалы, а также выявить адекватность модели.

Целью работы является исследование влияния технологических параметров лазерного излучения на возможность получения нано- и субмикроструктурных слоев. Причем исследования проводятся как теоретически, так и экспериментально.

Постановка проблемы. Получение нано- и субмикроструктур при действии ионизирующего излучения рассматривалось в довольно незначительном количестве экспериментальных и теоретических работ, а использование лазерного излучения для получения наноструктур на РИ практически не исследовалось. Предложенная в работе проблематика позволит оценить перспективы получения наноструктур и субмикроструктур на РИ, что говорит об актуальности и важности проводимых исследований.

Материалы исследований. В работе исследовались РИ из твердых сплавов Т15К6 и ТН20, а также минералокерамики Эльбор-Р. Экспериментальное исследование размера зерна проводилось благодаря электронно-металлографическим исследованиям на растровом электронном микроскопе РЭМ-106. Теоретическое исследование проводилось на основе решения совместной задачи теплопроводности и термоупругости в зоне действия ионизирующего излучения при варьировании плотности теплового потока и времени его действия и размера пятна.

Результаты исследования. Проведенные теоретические исследования позволяют получить зависимости объема нанокластера (НК) в зависимости от плотности теплового потока ионизирующего излучения и времени его действия при различных радиусах пятна. Такие зависимости представлены на рис. 1, а для случая действия лазерного излучения на твердый сплав Т15К6, при радиусах пятна от $2 \cdot 10^{-4}$ до $3 \cdot 10^{-3}$ м. Очевидно, что с ростом времени действия теплового потока растёт объем нанокластера, а затем

© Г.И. Костюк, 2015

наблюдается некоторое уменьшение размера зерна (рис. 1,а). С ростом времени действия теплового потока от 10^{-9} до 10^{-4} с наблюдается существенный рост объема нанозерна, который может составлять несколько порядков. Влияние размера радиуса пятна существенно и для $3 \cdot 10^{-3}$ м, размер зерна практически на 2-3 порядка больше, чем для $R > 10^{-4}$ м.

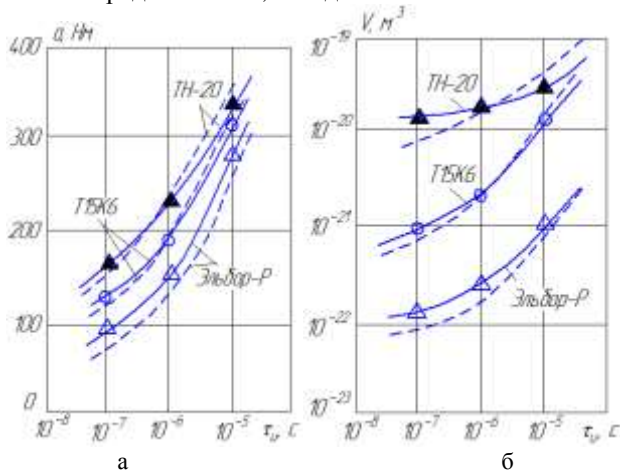


Рис. 1 – Сравнение теоретических (штриховые кривые) и экспериментальных зависимостей (сплошные кривые): а – размера зерна от времени действия ионизирующего облучения τ_u при плотности теплового потока $q = 10^{11}$ Вт/м²; б – объема нанокластера V от времени действия ионизирующего облучения τ_u при плотности теплового потока $q = 10^{11}$ Вт/м²

Для экспериментального исследования, которое проводилось для этого же твердого сплава Т15К6, получены размеры зерна и их зависимости от времени действия теплового потока и представлены на рис. 1, б. Очевидно, что с ростом времени действия теплового потока возрастает размер зерна, то есть характер зависимости совпадает с теоретическим (см., например, микрофотографию поверхности РИ при действии лазерного излучения $q = 10^{11}$ Вт/м² $\tau = 10^{-7}$ с) (рис. 2).

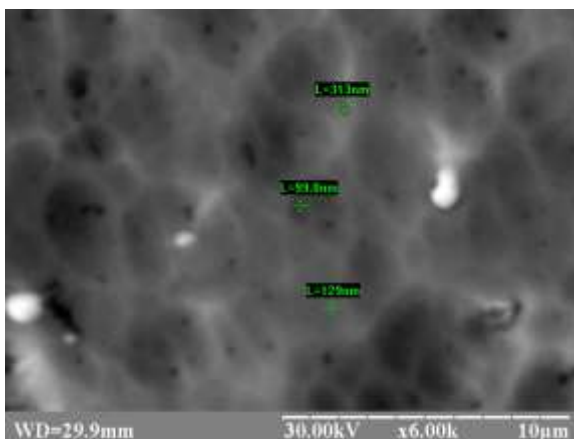


Рис. 2 – Микрофотография поверхности РИ из Эльбор-Р после лазерной обработки импульсами плотностью теплового потока $q = 10^{11}$ Вт/м² и временем его действия 10^{-7} с

Очевидно, что размер зерна лежит в диапазоне от 125 до 221 Нм. Аналогичные фотографии для остальных РИ из ТН20 и Эльбор-Р также позволяют

построить зависимости размера зерна от времени действия теплового потока, которые представлены на рис.1, б. Очевидно, что только для Эльбора-Р можно реализовать наноструктуру и то при высокой плотности теплового потока 10^{11} Вт/м² и времени действия 10^{-7} с.

Для того чтобы провести сопоставление результатов расчетов и экспериментов были рассчитаны размеры зерна по величине его объема полученного ранее. На рис. 1, б представлены также зависимости размера зерна от времени его действия при плотности теплового потока 10^{11} Вт/м². Видно, что результаты экспериментов и расчетов близки, что говорит об адекватности теоретической модели. В то же время результаты показывают, что в исследованном диапазоне плотностей теплового потока и времен его действия вероятность образования наноструктур невелика, а субмикроструктуры образуются практически всегда.

Выводы

1. Для режущих инструментов из твердых сплавов Т15К6, ТН20 и Эльбор-Р показано, что вероятность получения наноструктур невысока при действии лазерного излучения при высоких плотностях теплового потока 10^{11} Вт/м² и временах его действия 10^{-7} с. Тогда как субмикроструктуры, также обладающие более высокими физико-механическими характеристиками, чем микроструктуры, образуются практически всегда.

2. Теоретически обнаружено, что с ростом времени действия теплового потока (при одинаковой плотности теплового потока) наблюдается сначала рост размера зерна, а затем его снижение, что, очевидно, связано с характером развития температурного поля, которое при увеличении времени действия существенно перемещается вглубь материала РИ и на поверхности температуры уменьшаются, что понижает вероятность появления зерна небольшого размера, а следовательно, и наноструктур.

3. Экспериментально-теоретическое рассмотрение позволяет утверждать, что, увеличивая плотности теплового потока и существенно уменьшая время его действия до 10^{-9} с, можно получать наноструктуры. Это показано на примере Эльбора-Р, где есть вероятность появления наноструктур.

Список литературы: 1. Костюк, Г.И. Нанотехнологии: выбор технологических параметров и установок, производительность обработки, физико-механические характеристики наноструктур [Текст]: моногр. / Г.И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2014. – 472 с. 2. Костюк, Г.И. Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы [Текст]: моногр. / Г.И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 648 с. 3. Костюк, Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст] / Г.И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002.– Кн.1: Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, светолучевых и комбинированных технологий. –596 с. 4. Костюк, Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст] / Г.И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. – Кн. 2: Справочник для расчета основных физических и технологических парамет-

ров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования. – 482 с. **5.** Костюк, Г.И. Наноструктуры и нанопокрyтия: перспективы и реальность [Текст]: учеб. пособие / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с. **6.** Костюк, Г.И. Научные основы создания современных технологий [Текст]: учеб. пособие / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2008. – 552 с. **7.** Костюк, Г.И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем [Текст]: моногр.-справ. / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 633 с. **8.** Костюк, Г.И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем [Текст]: справ. / Г.И. Костюк. – М.: Вид-во АИИУ, 2003. – Кн. 2. – 412 с. **9.** Костюк, Г.И. Физико-технические основы роботизированного производства [Текст]: учеб. пособие / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. – 614 с. **10.** Гречихин, Л.И. Физика наночастиц и нанотехнологий [Текст] / Л.И. Гречихин. – М.: УП «Технопринт», 2004. – 397 с. **11.** Аксенов, И.И. Вакуумная дуга в эрозийных источниках плазмы [Текст] / И.И. Аксенов. – Х.: Изд-во НИИ «ХФТИ», 2005. – 211 с. **12.** Хаякава, С. Ядерно-физический аспект: в 2 кн. [Текст] / С. Хаякава. – М.: Мир, 1973. – Кн. 2. – 701 с. **13.** Готт, Ю.В. Взаимодействие частиц с веществом в плазменных исследованиях [Текст] / Ю.В. Готт. – М.: Атомиздат, 1978. – 271 с. **14.** Гусев, А.И. Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства [Текст] / А.И. Гусев. – Екатеринбург: Изд-во РАН, Уральское отд-ние, 1998. – 302 с. **15.** Гусев, А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии [Текст] / А.И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с. **16.** Решетняк, Е.Н. Синтез упрочняющих наноструктурных покрытий [Текст] / Е.Н. Решетняк, А.И. Стрельницкий // Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – № 2. – С. 119 – 130. **17.** Андриевский, Р.А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы [Текст] / Р.А. Андриевский // Физика металлов и металловедение. – 2003. – Т. 91, № 1. – С.50 – 56. **18.** Состав, структура и свойства наноструктурных пленок боридов тантала [Текст] / А.А. Гончаров, П.И. Игнатенко, В.В. Петухов и др. // ЖТФ. – 2006. – Т. 76, вып. 10. – С. 82 – 87. **19.** Бреус, А. А. Исследование стойкости режущего инструмента при обработке конструкционных материалов на станках с ЧПУ [Текст] / А. А. Бреус, Г.И. Костюк / Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 65. – Х.-2014. – С.49-53. **20.** Костюк, Г.И. Получение наноструктур в покрытии на твердосплавном режущем инструменте из VK8 и T15K6 [Текст] / Г. И. Костюк, О. Д. Григор / Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 66. – Х.-2014. – С.69-74. **21.** Костюк, Г.И. Микротвердость нано- и субмикроструктур в покрытии на режущих инструментах из твердых сплавов [Текст] / Г.И. Костюк, Е.В. Миргородская, О.О. Бруйка // Авиационно-космическая техника и технология. – 2014. – 6(113). – С. 24-29. **22.** Костюк, Г.И. Размер зерна в покрытии на режущем инструменте и его влияние на эффективность обработки [Текст] / Г. И. Костюк, А.П. Тарасюк, О.О. Бруйка / Наука и образование: сб. тр. VII Междунар. науч. конф., 27 февраля – 6 марта 2015. – г. Дубай (ОАЭ), 2015. – с. 69-72. **23.** Костюк, Г.И. Микротвердость нано- и субмикроструктурных покрытий на твердосплавных режущих инструментах и эффективность их работы [Текст] / Г.И. Костюк / Наука и образование: сб. тр. VII Междунар. науч. конф., 27 февраля – 6 марта 2015. – г. Дубай (ОАЭ), 2015. – с. 72-75.

Bibliography (transliterated): 1. Kostyuk, G.I. Nanotekhnologii: vybor tekhnologicheskikh parametrov i ustanovok, proizvoditel'nost' obrabotki, fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki nanostruk-tur [Текст]: monogr. / G.I. Kostyuk. - Kiev: Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovatP. tekhnologiy, 2014. - 472 P. Print 2. Kostyuk, G.I. Nanotekhnologii: teoriya, eksperiment, tekhnika, perspektivy [Текст]: monogr. / G.I. Kostyuk. - Kiev: Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovatP. tekhnologiy, 2012. - 648 P. Print 3. Kostyuk, G.I. Fiziko-tekhnicheskiye osnovy naneseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya,

lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy [Текст] / G.I. Kostyuk. - Kiev: Izd-vo AINU, 2002. - Kn.1: Fizicheskiye protsessy plazmenno-ionnykh, ionno-luchevykh, plazmennyykh, svetoluchevykh i kombinirovannykh tekhnologiy. -596 P. Print 4. Kostyuk, G.I. Fiziko-tekhnicheskiye osnovy naneseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy [Текст] / G.I. Kostyuk. - Kiev: Izd-vo AINU, 2002. - Kn. 2: Spravochnik dlya rascheta osnovnykh fizicheskikh i tekhnologicheskikh parametrov, otsenki vozmozhnostey, vybora tipa tekhnologiy i oborudovaniya. - 482 P. 5. Kostyuk, G.I. Nanostrukturny i nanopokrytiya: perspektivy i real'nost' [Текст]: ucheb.posobiye / G.I. Kostyuk. - Kharkov : NatP. aerokosm. un-t «Khark. aviatP. in-t », 2009. - 406 P. 6. Kostyuk, G.I. Nauchnyye osnovy sozdaniya sovremennykh tekhnologiy [Текст]: ucheb.posobiye / G.I. Kostyuk. - Kharkov : NatP. aerokosm. un-t «Khark. aviatP. in-t », 2008. - 552 P. Print 7. Kostyuk, G.I. Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem [Текст]: sprav.monogr.- / G.I. Kostyuk. - Kharkov: NatP. aerokosm. un-t «Khark. aviatP. in-t », 2007. - 633 P. Print 8. Kostyuk, G.I. Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem [Текст]: sprav.monogr.- / G.I. Kostyuk. - Kiev: Vid-vo AINU, 2003. - 412 P. Print 9. Kostyuk, G.I. Fiziko-tekhnicheskiye osnovy robotizirovannogo proizvodstva [Текст]: ucheb.posobiye / G.I. Kostyuk. - Kharkov: NatP. aerokosm. un-t «Khark. aviatP. in-t », 2006. - 614 P. Print 10. Grechikhin, L.I. Fizikano-nanochastits i nanotekhnologiy [Текст] / L.I. Grechikhin. - Moscow: UP «Tekhnoprint», 2004. - 397 P. Print 11. Aksenov, I.I. Vakuumnaya duga v erozionnykh istochnikakh plazmy [Текст] / I.I. Aksenov. - Kharkov : Izd-vo NII «KhFTI», 2005. - 211 P. Print 12. Khayakava, P. Yadernofizicheskiy aspekt: v 2 kn. [Текст] / P. Khayakava. - Moscow: Mir, 1973. - Kn. 2. - 701 pP. Print 13. Gott, YU.V. Vzaimodeystviye chastits s veshchestvom v plazmennyykh issledovaniyakh [Текст] / YU.V. Gott. - Moscow: Atomizdat, 1978. - 271 P. Print 14. Gusev, A.I. Nanokristalicheskkiye materialy: metody polucheniya i svoystva [Текст] / A.I. Gusev. - Yekaterinburg: Izd-vo RAN, Ural'skoye otd-niye, 1998. - 302 P. 15. Gusev, A.I. Nanomaterialy, nanostrukturny, nanotekhnologii [Текст] / A.I. Gusev. - Moscow: Fizmatlit, 2005. - 416 P. 16. Reshetnyak, Ye.N. Sintez uprochnyayushchikh nanostrukturnykh pokrytiy [Текст] / Ye.N. Reshetnyak, A.I. Strel'nitskiy // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. - 2008. - No 2. - P. 119 - 130. 17. Andriyevskiy, R.A. Nanomaterialy: kontseptsiya i sovremennyye problemy [Текст] / R.A. Andriyevskiy // Fizika metallov i metallovedeniye. - 2003. - T. 91, № 1. - P.50 - 56. 18. Sostav, struktura i svoystva nanostrukturnykh plenok boridov tantala [Текст] / A.A. Goncharov, P.I. Ignatenko, V.V. Petukhov i dr. // ZHTF. - 2006. - T. 76, vyP. 10. - P. 82 - 87. 19. Breus, A. A. Issledovaniye stoykosti rezhushchego instrumenta pri obrabotke konstruktсионnykh materialov na stankakh s CHPU [Текст] / A. A. Breus, G.I. Kostyuk / Otkrytyye informatsionnyye i komp'yuternyye integrirovannyye tekhnologii: sb. nauch. tr. NatP. aerokosm. un-ta im. N.Ye. Zhukovskogo «KhAI». - VyP. 65.- Kharkov. - 2014. - P. 49-53. 20. Kostyuk, G.I. Polu-cheniye nanostruktur v pokrytiye na tverdosplavnykh rezhushchikh instrumente iz VK8 i T15K6 [Текст] / G. I. Kostyuk, A. D. Grigor'yev / Otkrytyye informatsionnyye i komp'yuternyye integrirovannyye tekhnologii: sb. nauch. tr. NatP. aerokosm. un-ta im. N.Ye. Zhukovskogo «KhAI». - VyP. 66.- Kharkov. - 2014. - P. 69-74. 21. Kostyuk, G.I. Mikrotverdost' nano- i submikrostruktur v pokrytiye na rezhushchikh instrumentakh iz tverdyykh splavov [Текст] / G.I. Kostyuk, Ye.V. Mirgorodskaya, A.A. Bruyaka // Aviatсионно-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. - 2014. - 6 (113). - P. 24-29. 22. Kostyuk, G.I. Razmer zerna v tpokrytiy na rezhushchiy instrumente i yego vliyaniye na effektivnost' obrabotki [Текст] / G. I. Kostyuk, A.P. Tarasyuk, A.A. Bruyaka / Nauka i obrazovaniye: sb. tr. VII Mezhdunar. nauch. konf., 27 fevralya-6 marta 2015.- g. Dubay (OAE), 2015.- P. 69-72. 23. Kostyuk, G.I. Mikrotverdost' nano- i submikrostrukturnykh pokrytiy na tverdosplavnykh rezhushchikh instrumentakh i effektivnost' ikh raboty [Текст] / G.I. Kostyuk / Nauka i obrazovaniye: sb. tr. VII Mezhdunar. nauch. konf., 27 fevralya-6 marta 2015.- g. Dubay (OAE), 2015.-P. 72-75.

Поступила (received) 25.05.2015

Костюк Геннадий Игоревич – д-р техн. наук, проф., проф. Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Kostyuk Gennadiy Igorevich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Aerospace University Zhukovskiy, tel.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru.

УДК 621.91

С. АН. КЛИМЕНКО, С. А. КЛИМЕНКО, В. М. БЕРЕСНЕВ

ЗНОШУВАННЯ ТА СТІЙКІСТЬ РІЗАЛЬНИХ ІНСТРУМЕНТІВ ІЗ ПКНБ З ЗНОСОСТІЙКИМ ПОКРИТТЯМ НА ОСНОВІ НІТРИДУ БОРУ У АМОРФНОМУ СТАНІ

Одним із найбільш ефективних методів підвищення стійкості різальних інструментів із ПНТМ на основі КНБ, є нанесення на робочі поверхні інструменту функціональних наноструктурних зносостійких покриттів. Застосування таких покриттів дає можливість знизити температуру різання та покращити працездатність різального інструменту, завдяки цілеспрямованій зміні фізико-механічних та теплофізичних властивостей поверхневого шару, що дозволяє збільшити зносостійкість робочих поверхонь інструменту із ПНТМ на основі КНБ. Правильний вибір складу захисного покриття для конкретної операції обробки дає можливість підвищити продуктивність обробки та стійкість різальних інструментів із ПНТМ на основі КНБ.

Ключевые слова: процес різання, різальний інструмент із ПНТМ на основі КНБ, зносостійкі покриття, аморфний BN.

Вступ. Широке застосування захисних покриттів щодо інструментів з ПНТМ на основі КНБ почалося не так давно, це пов'язано з тим, що зносостійкі покриття, в більшості випадків, рідко перевищують фізико-механічні характеристики інструментальної основи. В якості покриттів для інструментів з ПНТМ на основі КНБ рекомендується використовувати матеріали, такі ж, як і для швидкорізальних і твердосплавних інструментів [1].

В основному це покриття на основі карбідів, боридів, оксидів та нітридів різноманітних металів та їх сполук, які характеризуються високою твердістю (25–45 ГПа), зносостійкістю, низьким коефіцієнтом тертя, високою теплопровідністю, але їх істотний недолік – високий ступінь залишкових напружень, які виникають в процесі його формування, що знижує експлуатаційні характеристики покриття [2, 3].

Розроблене покриття з аморфного BN на відміну від традиційних покриттів, поєднують в собі високу мікротвердість (твердість по Кнупу 17 ГПа) і достатню пластичність (модуль Юнга 220 ГПа) [4]. Результат від запропонованого покриття з аморфною структурою досягається за рахунок того, що на поверхнях контакту інструменту із стружкою і виробом, який обробляється, знижуються температури у зв'язку із зменшенням коефіцієнту тертя. Зменшення рівня залишкових напружень в покритті має місце у зв'язку з тим, що саме покриття та інструментальна основа, на які воно формується, близькі за хімічним складом, а структура покриття є аморфною. Перше призводить до зниження рівня залишкових напружень, за які відповідає різниця величин коефіцієнтів термічного розширення компонентів в композиті покриття-основа, друге пов'язане з відносною однорідністю матеріалу покриття.

Метою даної роботи є дослідження особливостей зношування та стійкості різальних інструментів із ПНТМ на основі КНБ із зносостійким покриттям з аморфного BN.

Методика проведення досліджень. Експериментальні дослідження проводилися на токарно-гвинторізному верстаті ФТ-11 при точінні сталі ШХ15 і ХВГ (60–62 HRC) інструментом з механічним кріпленням змінних непереточуваних різальних пластин RNMN 070300T (ТУ2-037-636-89) із ПКНБ марки «киборит». На робочі

поверхні пластин методом вакуумно-дугового осадження наносилося покриття у вигляді аморфного або аморфно-кристалічного нітриду бору (BN) товщиною 6 мкм.

Покриття системи BN формувалося шляхом розпилення мішені з гексагонального BN на установці оснащеної двома магнетронами і автономним джерелом живлення. Осадження матеріалу виконувалося при тиску аргону $P_{\text{Ar}} = 2 \cdot 10^{-1}$ Па, струмі 2,0 А, напрузі в розряді 500 В, час осадження – 35хв. (патент на винахід № UA106014). Мікроскопічні дослідження контактних ділянок інструменту виконувалися за допомогою скануючого електронного мікроскопа ZEISS EVO 50XVP (рис. 1).

Стійкісні дослідження інструментів із покриттям та без привелися при досягненні величина фаски зношення інструменту по задній поверхні – $h_3 = 0,3$ мм. Вимірювання ширини фаски зношення по задній поверхні проводилося за допомогою спеціального мікроскопу з ціною ділення 0,025 мм.

Результати досліджень. Зменшення довжини контакту стружки із передньою поверхнею та коефіцієнту усадки стружки при використанні зносостійкого покриття з BN у аморфному стані пов'язано із зменшенням коефіцієнтом тертя для інструменту із покриттям, що призводить до того, що стружка сходить по контактним поверхням більш інтенсивно при тих же швидкостях різання.

Наслідком зміни контактних характеристик процесу різання, викликаних нанесенням зносостійкого покриття на робочі поверхні різального інструменту, являється зменшення ділянки контакту стружки з передньою поверхнею, що призводить до перерозподілу теплових потоків та напружень в різальному інструменті.

Зміна термобаричних та силових умов навантаження різального інструменту із ПНТМ на основі КНБ при використанні зносостійкого покриття з аморфного BN, призводить до зменшення інтенсивності та характеру зношування різального інструменту із покриттям.

Під час точіння загартованих сталей при високих швидкостях різання та малих подачах, характерних для чистового точіння, контактні ділянки інструменту піддаються значному навантаженню, особливо передня поверхня інструменту, внаслідок малої зони контакту стружки, що призводить до прогинання та руйнування різальної кромки.

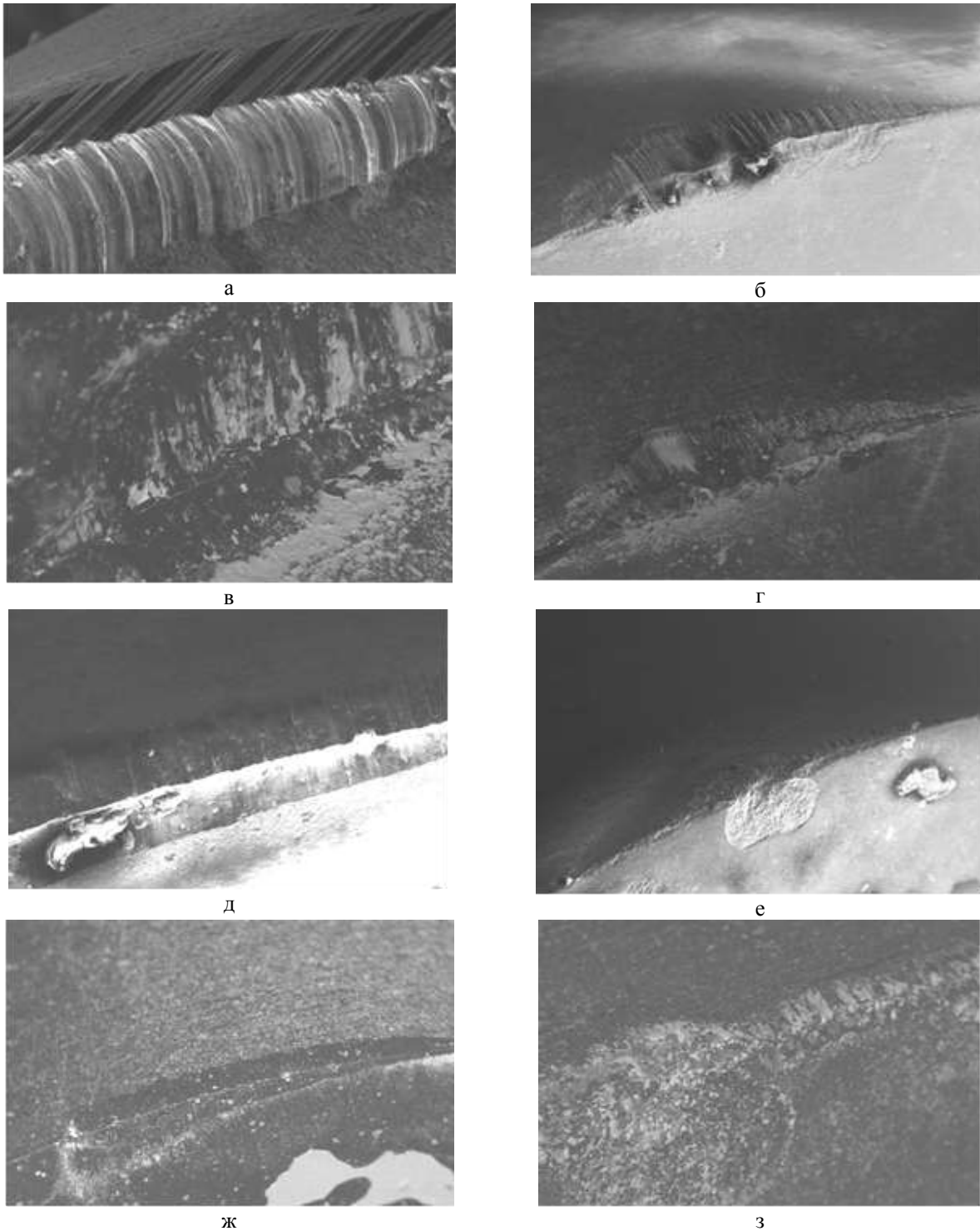


Рис. 1 – Зношені ділянки інструменту після обробки сталі ХВГ (62 HRC) ($S = 0,12$ мм/об; $t = 0,2$ мм): а–г – без покриття; д–з – із покриттям; в, г, ж, з – зображення в режимі фазового контрасту; а, д – $v = 1,5$ м/с; б, е – $v = 2,5$ м/с

Під час точіння загартованих сталей при високих швидкостях різання та малих подачах, характерних для чистового точіння, контактні ділянки інструменту піддаються значному навантаженню, особливо передня поверхня інструменту, внаслідок малої зони контакту стружки, що призводить до прогинання та руйнування різальної кромки.

В діапазоні швидкостей різання до 3,0 м/с найбільш руйнуючий вплив на різальну ромку інструменту має абразивний та адгезійний механізм зношуван-

ня, а також зношування викликане дією високої температури в зоні різання.

Для визначення механізмів зношування інструментів із зносостійким покриттям з аморфного BN, були проведені дослідження контактних ділянок інструменту після точіння сталі ХВГ в залежності від різних швидкостей різання. При точінні інструментом без покриття ($v = 1,5$ м/с) різальна кромка піддається інтенсивному абразивному зношуванню, наслідком якого являється поява симетричних впадин та виступів на передній та задній поверхні різальної пластини (рис. 1, а). Їх

поява пов'язана із наявністю в оброблюваному матеріалі твердих кристалічних включень (карбідів), а також самозношенням, викликане наявністю вільних зерен інструментального матеріалу. Симетричність ліній зношування пояснюється тим, що при зустрічі різальної кромки з твердими частинками відбувається руйнування останньої на декілька частин, які діють як по передній так і по задній поверхні як мікрорізці.

Найбільш інтенсивно абразивне зношування проявляється на невеликих швидкостях різання до 1,5 м/с, тому зношування контактних ділянок інструменту без покриття має абразивний характер.

Зі збільшенням швидкості різання до 2,5 м/с, змінюються умови контакту інструментального та оброблюваного матеріалу, що призводить до інтенсивного теплового впливу на різальну кромку інструменту (рис. 1, б), внаслідок чого вона оплавляється та інтенсивно зношується.

Зображення в режимі фазового контрасту (рис. 1, в, г) показують що в зоні різання, в наслідок адгезійної взаємодії, на контактних ділянках інструменту утворюються налипні метали. Наявність шару металу на контактних ділянках інструменту пов'язаний із дією високих навантажень та температур на поверхнях інструменту, які перебувають у безперервному контакті із оброблюваним матеріалом, що сприяє процесу схоплювання. Крім того, наявність в оброблюваному матеріалі твердих включень, які при зустрічі з поверхнями інструменту, руйнують оксидні плівки, цим самим створюючи хімічно чисті поверхні, що сприяє схоплюванню контактуючих матеріалів на окремих локальних ділянках.

При використанні зносостійкого покриття на основі аморфного BN, при швидкості різання до 1,5 м/с (рис. 1, д), на зображеннях зношених ділянок не має чітко виражених характерних борозд абразивного зношення, як по передній так і по задній поверхні інструменту, що дає підстави стверджувати, що покриття виступає у вигляді твердого лубриката, захищаючи контактні ділянки інструменту від дії твердих включень в оброблюваному матеріалі, тобто зменшуючи абразивне стирання різальної кромки.

При збільшенні швидкості різання до 2,5 м/с (рис. 1, е) різальна кромка інструмента із покриттям менш інтенсивно піддається тепловій дії. На зображенні відсутні сліди оплавлення та просідання різальної кромки, що пов'язано із зменшенням температури різання та довжини контакту стружки із передньою поверхнею інструменту, останнє призводить до того, що більша кількість тепла, яка утворюється в зоні різання, виноситься стружкою, менше інтенсивно нагріваючи контактні ділянки інструменту.

Зображення зношених ділянок інструменту із покриттям, отриманих в режимі фазового контрасту (рис. 1, ж, з) показують відсутність налипів оброблюваного матеріалу, як по передній так і по задній поверхні інструменту, що пов'язано із зменшенням температури різання та коефіцієнта тертя, що сприятливо позначається на стані різальної кромки.

Для перевірки працездатності різальних інструментів із ПНТМ на основі КНБ із зносостійким покриттям з аморфного BN та полікристалічного покриття (TiAlSi)N, були проведені стійкісні дослідження при обробці загартованих сталей ХВГ(62HRC) та ШХ15(60HRC) (рис. 2-5).

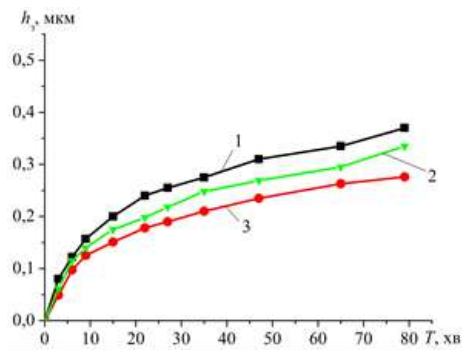


Рис. 2 – Залежність величини зносу по задній поверхні інструменту із покриттям від часу точіння сталі ХВГ ($v = 2,0$ м/с; $S = 0,14$ мм/об; $t = 0,2$ мм): 1 – інструмент без покриття (киборит); 2 – інструмент із покриттям з (TiAlSi)N; 3 – інструмент із покриттям з аморфного BN.

Стійкісні лабораторні дослідження проводилися на токарно-гвинторізному верстаті мод. ФТ11, непереточуваними різальними пластинами із ПНТМ на основі КНБ. Геометричні параметри різальних пластин: передній кут $\gamma = -10^\circ$, задній кут $\alpha = 10^\circ$, кут нахилу різальної кромки $\lambda = 0^\circ$.

Оброблюваний матеріал – загартована сталь ШХ15 (60 HRC), загартована сталь ХВГ (62 HRC).

Метод обробки – поздовжнє безперервне, безударне, чистове точіння циліндричних заготовок $\varnothing 90 - 100$ мм.

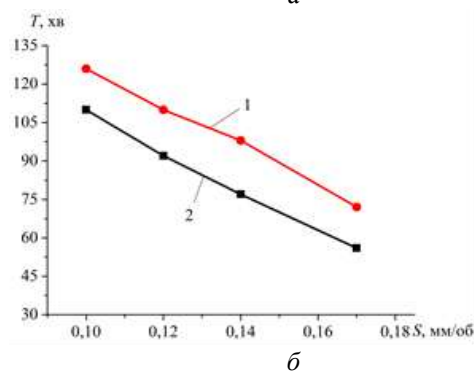
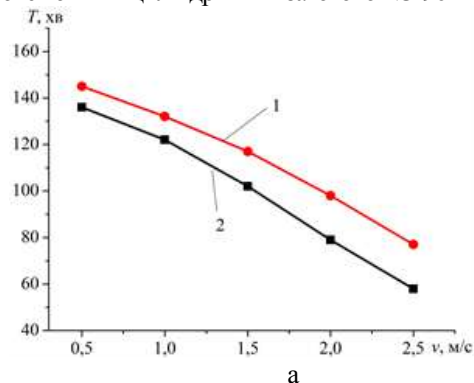


Рис. 3 – Стійкість різального інструменту без покриття (1) та із покриттям з аморфного BN (2) в залежності від: а – швидкості різання; б – подачі

Отримані результати стійкісних досліджень показали, що використання зносостійкого покриття з аморфного BN, дозволяє підвищити стійкість різальних інструментів із ПНТМ на основі КНБ в порівнянні із полікристалічним покриттям та інструментом без покриття: – при токарній, безударній обробці загартованої сталей (60-62 HRC) на 25 % в порівнянні з інструментом без покриття та на 20 % в

порівнянні із полікристалічним покриттям (TiAlSi)N; – знизити швидкість зношування інструментів із ПНТМ на основі КНБ при чистовій обробці загартованих сталей на 22 % та на 15 % в порівнянні із інструментом із полікристалічним покриттям.

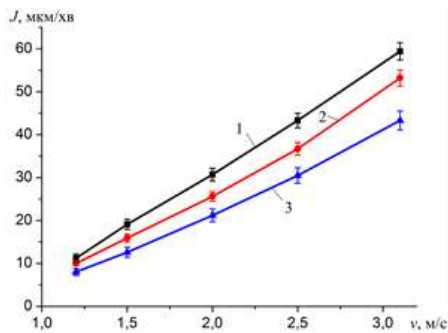


Рис. 4 – Вплив швидкості різання на швидкість зношування інструменту без покриття (1), із полікристалічним покриттям (TiAlSi)N (2), та покриттям з аморфного BN при точінні сталі ШХ 15 ($S = 0,14$ мм/об; $t = 0,2$ мм)

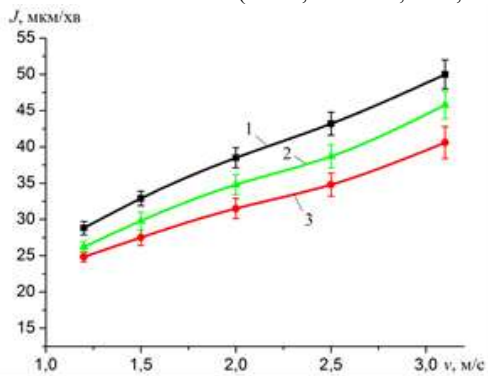


Рис. 5 – Вплив швидкості різання на швидкість зношування інструменту без покриття (1), із полікристалічним покриттям (TiAlSi)N (2), та покриттям з аморфного BN при точінні сталі ХВГ ($S = 0,14$ мм/об; $t = 0,2$ мм)

Слід також відмітити, що ефективність використання зносостійкого покриття з аморфного BN зростає із збільшенням швидкості різання, що дає змогу підвищити режими різання.

Висновки. Використання аморфного покриття з BN, має кращі результати ніж полікристалічне покриття (TiAlSi)N. Основним недоліком полікристалічного покриття є високий ступінь залишкових напружень, що обумовлює пониження властивостей різального інструменту із полікристалічним покриттям щодо можливості опору напруженням, які діють під час використання інструменту у процесі обробки.

Клименко Сергій Анатолійович – д-р техн. наук, проф., зам. директора Інституту надтвердих матеріалів ім. В.Н. Бакуля НАН України, м.Київ, тел.: (050)-331-19-22, e-mail: atmu@meta.ua;

Klymenko Serhii Anatoliiovych – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, deputy director of the V. N. Bakul Institute for Superhard Materials NAS of Ukraine, Kyiv, tel.: (050)-331-19-22, e-mail: atmu@meta.ua;

Клименко Сергій Анатолійович – мол. наук. співроб. Інституту надтвердих матеріалів ім. В.Н. Бакуля НАН України, м. Київ, тел.: (050)-331-19-22, e-mail: atmu@meta.ua;

Klymenko Serhii Anatoliiovych – Junior Research Fellow, V. N. Bakul Institute for Superhard Materials NAS of Ukraine, Kyiv, tel.: (050)-331-19-22, e-mail: atmu@meta.ua

Береснев В'ячеслав Мартинович – д-р техн. наук, проф. каф. матеріалів реакторобудування, Харківський Національний університет ім. В.М. Каразіна, тел.: (057) 705-46-67, e-mail: beresnev-scpt@yandex.ru;

Beresniev Viacheslav Martynovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department reactor materials V. N. Karazin Kharkiv National University, tel.: (057) 705-46-67, e-mail: beresnev-scpt@yandex.ru.

Внаслідок різності коефіцієнтів температурного розширення, полікристалічне покриття має недостатньо високу стійкість до утворення тріщин, в результаті чого, на етапі припрацювання, різальний інструмент руйнується внаслідок процесів утворення тріщин в його поверхневих шарах, а на етапі сталої роботи має підвищену швидкість зношування і втрачає працездатність за короткий проміжок часу.

Різальний інструмент із полікристалічним покриттям дозволяє оброблювати загартовані сталі із швидкостями 1,0-1,5 м/с, що не забезпечує продуктивність процесу різання при обробці виробів із важкооброблюваних матеріалів.

Використання аморфного покриття дозволяє підвищити стійкість різального інструменту із ПНТМ на основі КНБ в порівнянні із полікристалічним покриттям внаслідок зменшення термобаричного навантаження контактних ділянок інструменту, перерозподілу напружень та більшої стійкості до утворення тріщин. Такі властивості покриття дають можливість проводити чистову обробку загартованих сталей на швидкостях > 2,5-3,0 м/с.

Список літератури: 1. Копейкина М.Ю. Работоспособность режущего инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ с вакуумно-плазменным покрытием / Копейкина М.Ю., Клименко С.А., Мельничук Ю.А., Береснев В.М. // Сверхтвердые материалы. – 2008. – № 5. – С. 87-97. 2. Титов В.С. Покрyтия режущего инструмента. Состояние вопроса и перспективы // НМ – оборудование.–2004.– С.26-29. 3. Нанокмпозитные покрытия на основе нитридов переходных металлов / А.А. Дробышевская, Г.А. Сердюк, Е.В. Фурсова, В.М. Береснев // Физическая инженерия поверхности. – 2008. – Т. 6, № 1-2. – С. 81-88. 4. Новіков М.В. Різальний інструмент з покриттям / М.В. Новіков, С.А. Клименко, В.М. Береснев та ін. // Патент України на корисну модель № 106014. Промислова власність. – 2014. – Бюл. № 13.

Bibliography (transliterated): 1. Kopeykina M.YU. Rabotosposobnost' rezhushchego instrumenta, osnashchennogo PSTM na osnove KNB s vakuumno-plazmennym pokrytiyem / Kopeykina M.YU., Klimenko P.A., Mel'niychuk YU.A., Beresnev V.M. // Sverkhтвердые материалы. – 2008. – No 5. – P. 87-97. 2. Titov V.P. Pokrytiya rezhushchego instrumenta. Sostoyaniye voprosa i perspektivy // NM – oborudovaniye.– 2004.–P.26-29. 3. Nanokompozitnyye pokrytiya na osnove nitridov perekhodnykh metallov / A.A. Drobyshevskaya, G.A. Serdyuk, Ye.V. Fursova, V.M. Beresnev // Fizicheskaya inzheneriya poverkhnosti. – 2008. – Vol. 6, No 1-2. – P. 81-88. 4. Novikov M.V. Rízal'niy instrument z pokrittyam / M.V. Novikov, P.A. Klimenko, V.M. Beresnêv ta in. // Patent Ukraïni na korisnu model' No 106014. Promislova vlasnist'. – 2014. – Byul. No 13.

Поступила (received) 20.06.2015

УДК 519.874

А.П. ТАРАСЮК, Н. Ю. ЛАМНАУЕР

ДО ПИТАННЯ АНАЛІЗУ ТОЧНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ПОРШНЕВОГО ПАЛЬЦЯ

Розв'язується задача технології машинобудування, яка стосується аналізу точності технологічного процесу обробки. Запропоновано новий метод знаходження оцінок параметрів моделі розподілу випадкової величини – розміру. Надано формулу для розрахунку максимального відсотку якості деталей при обробці за застосованою технологією. Знайдені оцінки пропонуються використовувати в розрахунковій формулі для аналізу точності процесу обробки за показником, що досліджується. Результати досліджень застосовувалися для оцінки якості процесу обробки пальця поршня автомобіля ВАЗ.

Ключевые слова: якість, точність, розмір, обробка, аналіз.

Вступ. Аналіз якості технологічних процесів є важливим питанням, що розглядається в технології машинобудування. Забезпечення необхідної точності розміру деталей, як одного з показників якості, має велике значення при виготовленні машинобудівної продукції. Точність діаметрального розміру поршневого пальця не є виключенням. Поршневий палець виконує роль шарніра, тобто за його допомогою поршень з'єднується з верхньою головкою шатуна, завдяки чому шатун під час роботи двигуна набуває коливального руху відносно поршня. Палець виготовляють у вигляді порожнистого циліндричного стержня, зовнішню поверхню якого загартовують струмами високої частоти.

Для вирішення задач, що пов'язані з аналізом точності технологічних процесів обробки за параметром розміру широкі застосування мають ймовірностатистичні методи. Вони дозволяють за невеликою кількістю вимірювань робити висновок про якість процесу. Ймовірностатистичні моделі розподілу випадкової величини – розміру деталей та оцінки їхніх параметрів дозволяють розраховувати такі показники якості процесів, як коефіцієнт точності та коефіцієнт налагодженості процесу [1]. Тому, чим точніша модель застосовується та чим оцінки її параметрів є кращими, тим точніше аналіз якості технологічного процесу можливо провести.

Аналіз останніх досліджень та літератури. З огляду робіт вітчизняних та закордонних вчених [1,2] впливає, що для розподілу випадкової величини розміру застосовувалися симетричні закони. В [1] пропонуються розрахункові формули для аналізу точності та налагодженості технологічного процесу з урахуванням математичного очікування. Але з робіт [2,3] впливає, що цей розподіл не є симетричним. Запропонована в [4,5] несиметрична загальна модель розподілу має такі параметри, як нижню та верхню границі розміру, моду, параметр форми кривої щільності розподілу. Знайдені оцінки параметрів моделі в [4,5,6] за методами моментів, порядкових статистик й дисперсій, сплайн-апроксимації дозволили застосовувати її для рішення технологічних задач. Так в [5] запропоновано розрахунок нових формул коефіцієнтів: відносною асиметрії, точності та налагодженості технологічного процесу.

Метою даної статті є запропоновання оцінок параметрів моделі розподілу випадкової величини – розміру, з використанням методу зі застосуванням початкових моментів порядкових статистик. З використанням цих оцінок запропонувати розрахункову формулу для аналізу якості технологічного процесу обробки, а саме максимального відсотку якості, що може забезпечити ця технологія. Результати досліджень застосувати для аналізу якості технології обробки поршневого пальця автомобіля ВАЗ.

Постановка проблеми. Дослідження представлені роботи стосуються аналізу точності технологічного процесу обробки. Модель розподілу лінійного розміру та оцінки її параметрів, що представлені в [4,5,6], дозволили отримати формули аналізу точності технологічного процесу обробки за параметром, що досліджується [5]. Але ці методи оцінок параметрів не застосовували початкові моменти порядкових статистик, які дають змогу отримати більш повну інформацію про вибірку, тому що мають ентропію, яка дорівнює нулю. Знаходження оцінок параметрів за допомогою методу з використанням початкових моментів порядкових статистик дасть можливість мати більш точні оцінки та за їхньою допомогою розраховувати коефіцієнти точності та налагодженості технологічного процесу обробки.

Наукові дослідження. В роботах [5,6] показано, що в побудованій загальній моделі розподілу лінійних розмірів можливо виразити її параметри за допомогою заміни модального значення a через $a = (b + cq) / (1 + q)$, де a виражається через безрозмірну величину $q = (a - b) / (c - a) > 0$. Ця заміна дозволяє записати щільність розподілу випадкової величини - розміру x у вигляді:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{(1+k) \left[1 - \left(\frac{x-b+q(x-c)}{q(b-c)} \right)^{1+k} \right]}{c-b} & \text{при } b \leq x \leq \frac{b+qc}{1+q}; \\ \frac{(1+k) \left[1 - \left(\frac{b-x+q(c-x)}{b-c} \right)^{1+k} \right]}{c-b} & \text{при } \frac{b+qc}{1+q} < x \leq c. \end{cases} \quad (1)$$

та функцію розподілу:

©А. П. Тарасюк, Н. Ю. Ламнауер, 2015

$$F(x) = \begin{cases} \frac{k \left[\frac{b-x+q(c-x)}{q(c-b)} \right]^{-k} (b+q-x-xq)}{(1+q)(c-b)} + \frac{[(1+q)(x-b+lx) - k(b+q)]}{(1+q)(c-b)} & \text{при } b \leq x \leq \frac{b+q}{1+q}; \\ \frac{k \left[\frac{b-x+q(c-x)}{c-b} \right]^{-k} (b+q-x-xq)}{(1+q)(c-b)} + \frac{[(1+q)(x-b+lx) - k(b+q)]}{(1+q)(c-b)} & \text{при } \frac{b+q}{1+q} < x \leq c \end{cases} \quad (2)$$

де a - модальне значення, b - нижня межа та c - верхня межа розміру, k - параметр форми розмірів.

Для оцінки параметрів застосуємо порядкові статистики [7], оскільки вони мають ентропію, що дорівнює нулю, а це означає, що мається можливість отримати максимальну інформацію про вибірку [8].

Якщо ми маємо вибірку об'єму n , то щільність розподілу i -ої порядкової статистики визначається формулою:

$$y_n(x_{(i)}) = n C_{n-1}^{i-1} [F(x)]^{i-1} [1 - F(x)]^{n-i} f(x). \quad (3)$$

Звідси, математичне очікування i -ої порядкової статистики з вибірки об'єму n визначається для моделі (1) у вигляді:

$$\mu_{i:n} = \int_b^a x y_n(x_{(i)}) dx + \int_a^c x y_n(x_{(i)}) dx \quad (4)$$

Вивчаючи властивості математичного очікування i -ої порядкової статистики (3) було встановлено, що для одного об'єму вибірки n різниці $\mu_{i:n} - \mu_{j:n}$ ($i \neq j$) має множник $c - b$. Це дозволяє у відношенні цих різниць виключити параметри c та b . Маючи незміщені спроможні оцінки математичних очікувань i -ої порядкової статистики вибірки об'єму j за результатами варіаційного ряду об'єму n :

$$\tilde{\mu}_{i,j} = \frac{1}{C_n^j} \sum_{l=i}^{n+i-j} C_{l-1}^{i-1} C_{n-i}^{j-i} x_{(l)}, \quad (5)$$

можна визначити оцінки параметрів моделі (1) k та q з розв'язання системи:

$$\begin{cases} (\mu_{5,5} - \mu_{1,5}) / (\mu_{4,5} - \mu_{3,5}) = (\tilde{\mu}_{3,5} - \tilde{\mu}_{1,5}) / (\tilde{\mu}_{4,5} - \tilde{\mu}_{3,5}); \\ (\mu_{3,3} - \mu_{2,3}) / (\mu_{1,2} - \mu_{1,3}) = (\tilde{\mu}_{3,3} - \tilde{\mu}_{2,3}) / (\tilde{\mu}_{1,2} - \tilde{\mu}_{1,3}). \end{cases} \quad (6)$$

Вибір об'єму 5 для математичних очікувань порядкових статистик пов'язано для систем (6) з тим, що модель має 4 параметри та додатково необхідно мати хоч ще один параметр свободи.

Оцінка параметрів b та c може бути знайдена з розв'язання системи за знайденими значеннями параметрів k та q :

$$\begin{cases} \mu_{1,2} - \mu_{1,3} = \tilde{\mu}_{1,2} - \tilde{\mu}_{1,3}; \\ \frac{3kb + kbq + b + bq + 3kqc + kc + c + qc}{2(1+q)(2k+1)} = \bar{x}, \end{cases} \quad (7)$$

де ліва частина другого рівняння є математичне очікування моделі (1), а його права частина – вибіркове середнє результатів вимірювань розмірів.

З заміни $a = (b + cq) / (1 + q)$ знаходимо оцінку параметра \tilde{a} за знайденими оцінками параметрів b , c та q .

Для розв'язання системи (6), (7) та оцінки параметра \tilde{a} в системі Maple складена комп'ютерна програма. Використовуючи цю програму для моделі (1) та метод статистичного моделювання було встановлено, що при навання взятих параметрах: $b = 1$, $a = 2$, $c = 8$ та $k = 0,5$ при об'ємах вибірки $n = 10$ в кількості 100 штук, оцінки, отримані цим методом, є кращими, ніж раніше отримані іншими методами. Тобто середнє цих оцінок близько до заданих значень та дисперсія цих оцінок менша за дисперсію раніше отриманих.

Була поставлена задача: за результатами 68 вимірювань зовнішнього діаметру пальця поршня ВАЗ проаналізувати отримані результати та зробити висновок про якість технології виготовлення пальця. За результатами вимірювань були знайдені числові характеристики випадкової величини за вибіркою діаметра пальця, які наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 - Числові характеристики діаметра пальця

Середнє значення \bar{x}	21,97598676
Емпіричний стандарт S	0,00164443
Коефіцієнт асиметрії As	0,39846036
Коефіцієнт ексцесу Es	2,53842767

З таблиці видно, що розподіл розмірів діаметрів несиметричний та має малий розкид, й форма розподілу близька до трикутної. Застосовуючи загальний закон розподілу розмірів (1), знайдемо його параметри за запропонованим методом із застосуванням (6) та (7). З використанням програми в системі Maple були визначені параметри моделі: $k = 0,7097052$; $q = 0,2982125$; $b = 21,9722196$; $a = 21,9739268$; $c = 21,9796517$. Функція щільності розподілу зовнішнього діаметру пальця представлена на рисунку 1.

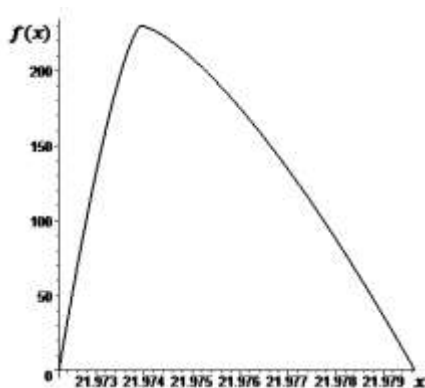


Рис. 1 - Графік щільності розподілу зовнішнього діаметра пальця

Результати досліджень. Використовуючи критерій Колмогорова [9] і функцію розподілу (2) за знайденими параметрами моделі (1) та результатами досліджень зовнішнього діаметра пальця було встановлено, що при рівні значущості $\alpha = 0,05$ результати узгоджуються із запропонованим законом.

Отримана модель дозволяє одержати формулу для визначення максимального відсотку якості, що може забезпечити застосована технологія обробки:

$$\Delta \cdot 100\% = \frac{T}{c-b} \left[1 + k - k \left(\frac{T}{c-b} \right)^{\frac{1}{k}} \right] \cdot 100\% , \quad (8)$$

де T - допуск розміру, c та b - відповідно нижня та верхня прогнозовані границі розміру, k - параметр форми моделі розподілу розміру.

Аналіз якості технології виготовлення пальця поршня ВАЗ за запропонованою формулою (8) дає такий відсоток: $\Delta \cdot 100\% = 80,35\%$. Відсоток розмірів пальців, що належить полю допуску, дорівнює 67,94%. Це свідчить про те, що настройка станка проводилася для застосованої технології неправильно та, що є можливість отримати більш високий відсоток якості. Для отримання максимальної якості при застосованій технології був розрахований розмір, на який необхідно настроювати станок, що дорівнює 21,9762 мм, тобто на 0,001 мм більше, ніж розмір, на який була проведена настройка – 21,9752 мм.

Висновки.

1. Запропоновано метод оцінки параметрів моделі розподілу випадкової величини розміру з використанням математичних очікувань порядкових статистик, які мають ентропію, що дорівнює нулю, а це дає змогу отримати максимальну інформацію про вибірку.

2. Одержано формулу розрахунку максимального відсотка якості деталей за параметром лінійного розміру для аналізу якості технології обробки.

3. Пропонується використовувати отримані оцінки параметрів моделі розподілу випадкової величини – лінійного розміру у формулі розрахунку відсотку якості.

4. Застосування результатів теоретичних досліджень на прикладі вибірки деталей – пальців поршня довело, що настройка станка при обробці пальця проводилася невірно.

5. Розраховано значення величини розміру, на який необхідно настроювати станок при обробці поршневого пальця при існуючій технології.

Список літератури: 1. Косилова А.Г. Справочник технолога – машиностроителя. В 2-х томах [Текст] / А.Г. Косилова, Р.К. Мещеряков, М: Машиностроение, - 1986. – 656 с. 2. Маталін А.А. Технологія машиностроєння: Учебник для машиностроїтельних вузів по спеціальності «Технологія, металорежущі станки і інструменти» [Текст] / А.А. Маталін. - Л.: Машиностроєння, Ленінгр. отд-ние, 1985. - 496с. 3. Бородачев Н. А. Точність виробництва в машиностроєнні і приборостроєнні [Текст] / Н.А. Бородачев, Р.М. Абдрашитов і др. - М.: Машиностроєння, 1973г.- 567 с. 4. Ламнауєр Н.Ю. Распределение размеров изготовления изделий [Текст] / Н.Ю. Ламнауєр // Високи технології в машинобудуванні: збірник наукових праць. – Харків, НТУ «ХП», 2012. –Вип.1(22). – С.177-181. 5. Ламнауєр Н.Ю. Модель распределения размеров изделий и ее применение для оценки точности обработки [Текст] / Н.Ю. Ламнауєр // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХП», 2012. - №27.- С. 98-107. 6. Ламнауєр Н.Ю. Загальна модель розподілу лінійних розмірів деталей та її застосування для поліпшення якості виробів [Текст] / Н.Ю. Ламнауєр // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХП», 2013. - №54(1027).- С.134-143. 7. Дейвид Г. Порядковые статистики пер. с англ. под ред. В. В. Петрова [Текст] / Г. Дейвид – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. -336с. 8. Ефимов А. Н. Порядковые статистики — их свойства и приложения [Текст] / А.Н. Ефимов,- М: Знание, 1980. - 64 с. 9. Крамер Г. Математические методы статистики: Пер. с англ. Под ред. А. Н. Колмогорова [Текст] / Г. Крамер. –М.: «Мир». -1976. – 623 с.

Bibliography (transliterated): 1. Kosilova, A.G. *Spravochnik tekhnologa – mashinostroitel'ya*, 1986. Print. 2. Matalin A.A. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 1985. Print. 3. Borodachev N.A. *Tochnost proizvodstva v mashinostroenii i priborostroenii*, 1973. Print. 4. Lamnauer, N.Y. *Raspredelenie razmerov izgotovleniya izdeliy*. Visoki tehnologii v mashinobuduvanni NTU «KhP», 2012. Print. 5. Lamnauer, N.Y. *Model raspredeleniya razmerov izdeliy I ee primenenie Tochnost proizvodstva v mashinostroeniidlya ocenki tochnosti obrabotki*. Visnik NTU «KhP», 2012. Print. 6. Lamnauer, N.Y. *Zagalna model rozpodilu liniynih rozmiriv detaley ta yiyi zastosuvannyadlya polipshennya yakosti virobiv*. Visnik NTU «KhP», 2012. Print. 7. Deyvid, G. *Poryadkovie statistiki*, 1979. Print. 8. Efimov A.N. *Poryadkovie statistiki – ih svoystva i prilozheniya*, 1980. Print. 9. Kramer G. *Matematicheskie metodi statistiki*. 1976. Print.

Поступила (received) 12.10.15

Тарасюк Анатолій Петрович – док. техн. наук, проф. УІПА, м. Харків, тел.: (057)-733-78-26, e-mail: tarasyuk@uipa.edu.ua;

Tarasiuk Anatolii Petrovych – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy, Kharkiv, tel.: (057)-733-78-26, e-mail: tarasyuk@uipa.edu.ua;

Ламнауєр Наталія Юрїївна – канд. техн. наук, доц. УІПА, м. Харків, тел.: (057)-733-78-18, e-mail: lamnaouernatali@mail.ru;

Lamnauer Nataliia Yuriivna – Candidate of Technical Sciences, assistant professor, Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy, Kharkiv, tel.: (057)-733-78-18, e-mail: lamnaouernatali@mail.ru.

УДК 621.865.6

*Г.И. КОСТЮК, БЕХЗАД РАЗМДЖУИ, О.О. БРЮЯКА***ТЕМПЕРАТУРЫ И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ДЕЙСТВИИ ИОНОВ НА МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ И ВОЗМОЖНОСТЬ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОСТРУКТУР**

В работе были исследованы поля температур и скорости их возрастания, а также температурные напряжения при действии ионов V^+ , N^+ , C^+ , Al^+ , V^+ , Cr^+ , O^+ , Ni^+ , Zr^+ , Mo^+ , Hf^+ , W^+ , Ta^+ , Pt^+ с зарядом от одного до трех на магниевые сплавы. Так, диапазон максимальных температур лежит в пределах от $1,82 \cdot 10^2$ до 3,9 К, а скорость изменения температуры меняется от 10^{14} до 10^{17} К/с. Исследование зависимости этих величин от энергии ионов и заряда позволило найти области в объеме материала, где реализуются температуры достаточные для образования наноструктур, но в то же время температуры не приводят к росту зерна, то есть получены технологические параметры потоков иона, которые обеспечивают получение наноструктур.

Ключевые слова: температура, скорости нарастания температуры, температурные напряжения, ионы, магниевые сплавы, заряд, энергия ионов

Введение. Магниевые сплавы обладают высокими физико-механическими характеристиками и широко применяются в авиационной технике, что говорит о необходимости улучшения их свойств, так как современные авиационные конструкции и особенно авиационные двигатели работают при высоких скоростях и довольно высоких температурах, что выдвигает дополнительные требования к деталям, обеспечивающим работоспособность двигателя. Так например, лопатки компрессора, особенно первых степеней, испытывают действие микро- и макро- частиц, которые приводят к эрозии, то есть дополнительно необходимо обеспечивать и высокую эрозионную прочность (стойкость), а для того чтобы обеспечить эти характеристики, необходимо конструировать материал таким образом, чтобы он имел высокую твердость на поверхности, но в то же время мог деформироваться на большие величины, не испытывая разрушения. Исследования многих авторов показали, что наноструктурные слои имеют пониженный модуль упругости, что позволяет повысить работоспособность деталей, работающих на ударные нагрузки, так как даже при больших перемещениях материала будем иметь относительно невысокие напряжения [1]. Исследования также показывают, что наноструктуры имеют высокие антикоррозионные свойства, что также подтверждает тезис о необходимости использования наноструктурных слоев для снижения воздействия агрессивных сред [2].

Работа выполнялась в рамках программы Министерства образования и науки Украины «Новые и ресурсосберегающие технологии в энергетике, промышленности и агропромышленном комплексе» (подсекция 13 «Аэрокосмическая техника и транспорт») и по темам: «Создание физико-технических основ повышения качества материалов аэрокосмических конструкций» и «Разработка технологических основ интегрированных технологий плазменно-ионной обработки деталей аэрокосмической техники» (подсекция 6 «Физико-технические проблемы материаловедения») «Концепция создания наноструктур, нано- и традиционных покрытий с учетом влияния адгезии на эффективность и работоспособность деталей АТ, АД и РИ», «Экспериментально-теоретическое исследование получения наноструктур при действии

ионных и свето-лучевых потоков на конструкционные материалы и РИ», хозяйственных работ и договоров о сотрудничестве.

Анализ последних исследований и литературы. В настоящее время достаточно много работ [3–10], которые посвящены исследованию размера зерна наноструктуры, что весьма оправдано, так как размер зерна наноструктуры влияет на её физико-механические характеристики. Так наблюдалось влияние его на микротвердость, предел усталости, предел текучести, коэффициент трения. Всё это еще раз подтверждает необходимость прогнозирования размера зерна. Моделей, которые бы прогнозировали размер зерна, небольшое количество [1, 2], но они не учитывают необходимую энергию на образование зерна наноструктуры, поэтому мы использовали новую модель, которая учитывала практически все взаимосвязи не только крайних атомов в зерне, но и в объеме наноструктуры, для чего отдельно рассчитывали число частиц в нанокластере, а потом рассматривали их взаимодействие с остальными зёрнами. Применение такой модели позволяет обеспечить в энергетическом плане более точное определение энергии на повышение температуры и температурные напряжения.

Целью данной статьи является исследование влияния технологических параметров потоков ионов различной энергии, сорта и заряда на температуру, скорость её нарастания и температурные напряжения, что позволяет оценить возможность получения наноструктур в объеме конструкционного материала.

Постановка проблемы. В настоящее время значительное количество работ посвящено исследованию возможности получения наноструктур [1–14], основной объем работ выполнен по проведению эксперимента [11–14], теоретических же работ в этом плане очень мало [1–2], что не позволяет прогнозировать технологические параметры потоков ионов для получения наноструктур в различных конструкционных материалах; это говорит об актуальности и важности исследования.

Благодаря экспериментальным работам, удалось оценить диапазон температур, скоростей их нарастания и величин температурных напряжений, которые необходимы для получения наноструктур. Так, критериями получения наноструктур примем такие: диапа-

© Г.И. Костюк, Бехзад Размджуй, О.О. Брюяка, 2015

зон температур 500–1500 К, скорость нарастания температуры более 10^7 К/с. Для ускорения получения наноструктур необходимо действие напряжений в диапазоне от 10^7 до 10^9 Па (для получения наноструктур за счет действия напряжений возможно при напряжениях, равных 10^{10}).

Материалы исследований получены на основе решения совместной задачи теплопроводности и термоупругости [1] в зоне действия индивидуального иона. Решение проводилось численным методом МКЕ, получены поля температур и температурных напряжений, что позволяет оценить реальность получения наноструктур.

Результаты исследований. Для ионов В+, N+, С+, Al+, V+, Cr+, O+, Ni+, Zr+, Mo+, Hf+, W+, Ta+, Pt+, действующих на магниевый сплав, получены зависимости максимальной температуры, максимальных и минимальных температурных напряжений от энергии ионов с различными зарядами ($Z = 1$; $Z = 2$; $Z = 3$).

Так, для случая действия ионов бора и углерода такие зависимости представлены на рис. 1. Очевидно, что температуры (рис. 1, а) существенно возрастают с ростом энергии и достигают температур $6,7 \cdot 10^3$ К при действии ионов бора ($Z = 3$), тогда как для ионов углерода эти величины значительно меньше – порядка $5 \cdot 10^3$. Уменьшение заряда приводит к существенному снижению температур и они достигают $5 \cdot 10^3$ – в случае действия иона бора и $4 \cdot 10^3$ – при действии ионов углерода. Очевидно, что рост массы иона приводит к снижению температур. Температурные напряжения с ростом величины энергии, растут. Так, максимальные температурные напряжения сначала плавно возрастают, а затем их скорость роста увеличивается и достигает постоянной стационарной. Максимальные температурные напряжения для ионов бора достигают величин $7,6 \cdot 10^8$ ($Z = 3$), энергия – $2 \cdot 10^4$ эВ, а для ионов углерода они меньше $6,2 \cdot 10^8$ для тех же условий. При малых энергиях иона величины напряжений снижаются практически на порядок, хотя для бора они несколько выше, чем для углерода (рис. 1, б). Для минимальных температурных напряжений зависимости температуры от энергии ионов, т.е. сначала наблюдается быстрый рост, а затем – практически линейная зависимость от энергии. Величины минимальных температурных напряжений снизились больше чем на порядок (рис. 1, в). Так, максимальные значения, которые уже реализуются для ионов углерода, соответствуют $4,25 \cdot 10^7$ Па. В этом случае напряжения для ионов бора меньше и составляют $3,2 \cdot 10^7$ Па. Снижение величины заряда иона приводит к уменьшению минимальных температурных напряжений, но характер зависимостей сохраняется. Для малых значений энергии ($E_i=200$) минимальные значения напряжений становятся меньше чем 10^7 Па. Исследование температурных напряжений показало: температурные напряжения по величине не достаточны для образования наноструктур, но могут существенно ускорить этот процесс при соответствующих температурах (500 – 1500 К). Исследование скорости роста температуры

показало, что практически для всех исследованных режимов она превышает 10^7 К/с.

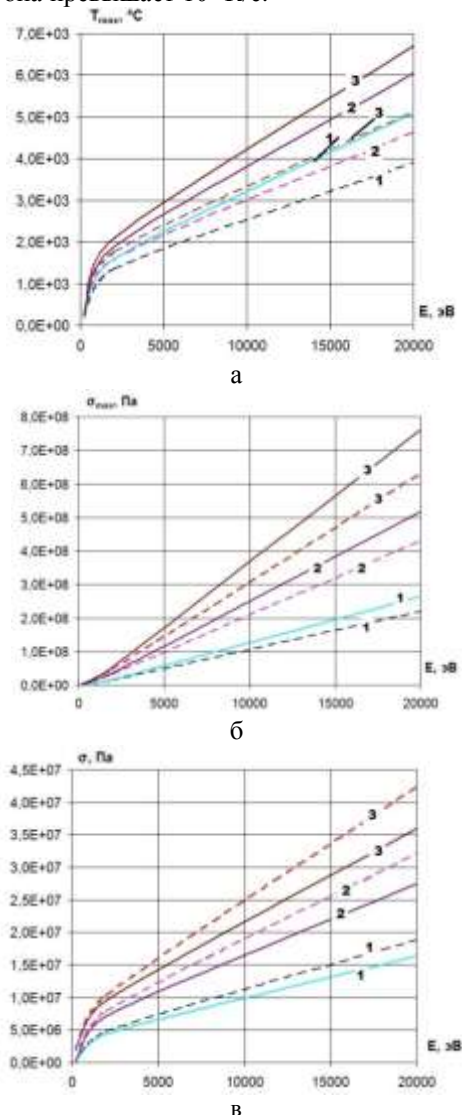


Рис. 1 – Зависимости различных показателей от энергии ионов бора (–) и углерода (– –) при их действии на магниевые сплавы ($Z = 1$ кривые 1, 2; $Z = 2$ кривые 3, 4; $Z = 3$ кривые 5, 6): а – зависимость максимальных температур; б – зависимость максимальных температурных напряжений; в – зависимость минимальных температурных напряжений

Аналогичные зависимости для случая действия ионов азота и алюминия на магниевые сплавы представлен на рис. 2. Так, максимальные температуры растут с ростом энергии иона, а характер аналогичен действию ионов бора и углерода. В этом случае максимальные температуры достигают значений, близких $2 \cdot 10^4$ К ($Z = 3$) и $1,5 \cdot 10^4$ К ($Z = 1$) ионы азота. Для ионов алюминия температуры существенно ниже и составляют $8 \cdot 10^3$ и $6,1 \cdot 10^3$ К для $Z = 3$ и $Z = 1$ соответственно (рис. 2, а). Максимальные температурные напряжения плавно растут при малых энергиях, а при больших наблюдается практически линейная зависимость напряжений от энергии ионов, причем для случая действия иона азота они существенно выше и достигают значений $1,6 \cdot 10^9$ Па при $Z = 1$ и $E_i = 2 \cdot 10^4$ эВ, тогда как для ионов алюминия они составляют $8,4 \cdot 10^8$ Па в этих же условиях. Уменьшение

величины заряда иона приводит к существенному снижению напряжений и они составляют $4,8 \cdot 10^8$ и $3 \cdot 10^8$ Па. При малых энергиях ионов эти напряжения порядка 10^7 Па (рис 2, б).

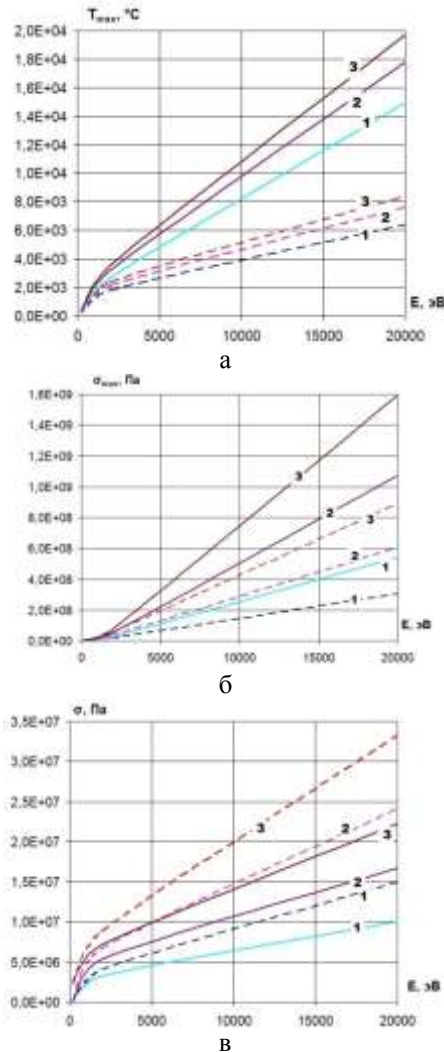


Рис. 2 – Зависимость различных параметров от энергии ионов азота (–) и алюминия (– –) при их действии на магниевые сплавы ($Z = 1$ кривые 1, 2; $Z = 2$ кривые 3, 4; $Z = 3$ кривые 5, 6): а – зависимость максимальных температур; б – зависимость максимальных температурных напряжений; в – зависимость минимальных температурных напряжений

Для минимальных температурных напряжений, как и в предыдущем случае, значения напряжений для случая действия ионов алюминия несколько выше, чем для ионов азота, а их максимальные значения достигают $3,3 \cdot 10^7$ и 10^7 Па, при минимальных энергиях их значения также незначительны.

Характер изменения величин соответствует ионам бора и углерода (рис. 2, в). Очевидно, что значения температурных напряжений несколько увеличилось по сравнению с ионами бора и углерода.

Для ионов ванадия и хрома зависимости температур и температурных напряжений от энергии представлены на рис. 3. Характер зависимостей практически сохранился как для ионов бора и углерода, но величины температур, минимальных и максимальных температурных напряжений практически одинаковы для ванадия и хрома, хотя величины как максимальных

температур ($3,4 \cdot 10^4$ К), так и максимальных напряжений ($2,25 \cdot 10^9$ Па) превышают аналогичные значения для ионов бора, углерода, азота и алюминия, а минимальные напряжения несколько ниже – $1,8 \cdot 10^7$ Па (рис. 3 б, в).

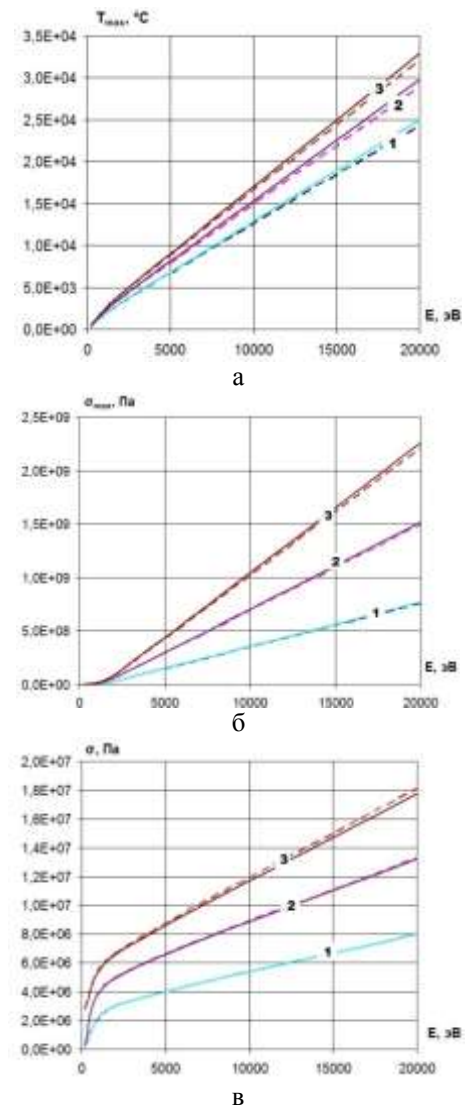


Рис. 3 – Зависимости различных показателей от энергии ионов ванадия (–) и хрома (– –) при их действии на магниевые сплавы ($Z = 1$ кривые 1, 2; $Z = 2$ кривые 3, 4; $Z = 3$ кривые 5, 6): а – зависимость максимальных температур; б – зависимость максимальных температурных напряжений; в – зависимость минимальных температурных напряжений

В случае действия ионов кислорода и железа на магниевые сплавы характер изменения температур и напряжений сохранился (рис. 4). Максимальные температуры реализуются для ионов кислорода и лежат в пределах от $3,4 \cdot 10^4$ до $2,6 \cdot 10^4$ К соответственно при энергиях $2 \cdot 10^4$ эВ и $Z=3$. Для ионов железа температуры значительно ниже и составляют 10^4 и $7 \cdot 10^4$ К при тех же энергии и заряде (рис. 4, а). Температурные напряжения как максимальные, так и минимальные имеют значения, близкие к предыдущим, но минимальные несколько выше – $3,1 \cdot 10^7$ Па (рис. 4 б, в).

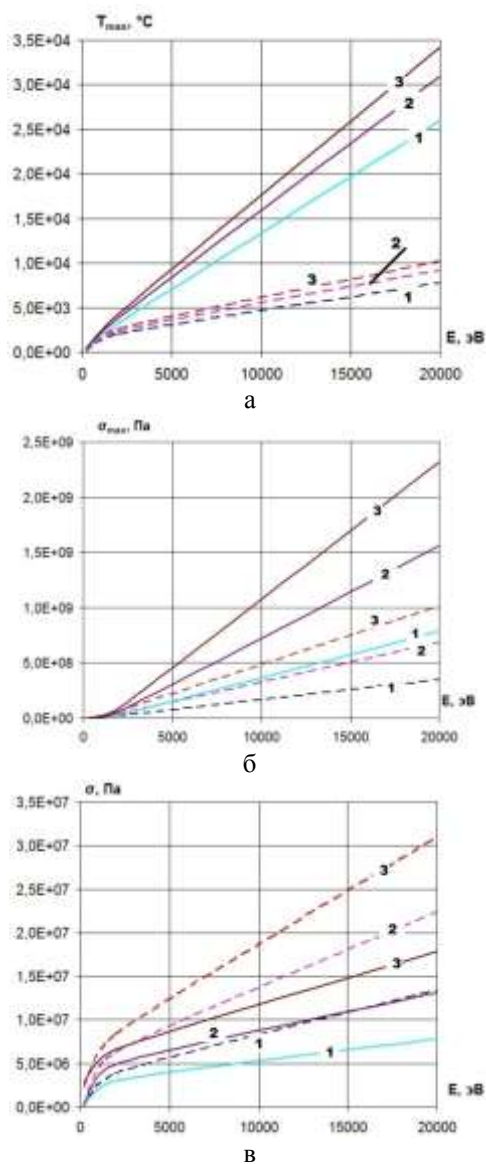


Рис. 4 – Зависимости различных показателей от энергии ионов кислорода (–) и железа (–) при их действии на магниевые сплавы ($Z = 1$ кривые 1, 2; $Z = 2$ кривые 3, 4; $Z = 3$ кривые 5, 6): а – зависимость максимальных температур; б – зависимость максимальных температурных напряжений; в – зависимость минимальных температурных напряжений

При действии ионов никеля и кобальта на магниевый сплав распределение температур (рис. 5, а), максимальных (рис. 5, б) и минимальных температурных напряжений (рис. 5, в) обнаружено, что для обоих ионов реализуются практически одинаковые температуры и температурные напряжения.

Так, температуры составляют $3,5 \cdot 10^4$ К ($E_i = 2 \cdot 10^4$ эВ, $Z=3$), уменьшение заряда приводит к снижению температур до $2,6 \cdot 10^4$ К ($Z=1$). Для малых энергий (200 эВ) температуры практически не отличаются и составляют $4 \cdot 10^3$ К для всех зарядов (рис. 5, а). Максимальные температурные напряжения для обоих ионов – $2,3 \cdot 10^9$ Па ($E_i = 2 \cdot 10^4$ эВ, $Z=3$), с уменьшением заряда они существенно уменьшаются и составляют $8 \cdot 10^8$ Па ($Z = 1$). Для малых энергий напряжение составляет величины порядка 10^8 Па практически для всех зарядов (рис. 5, б).

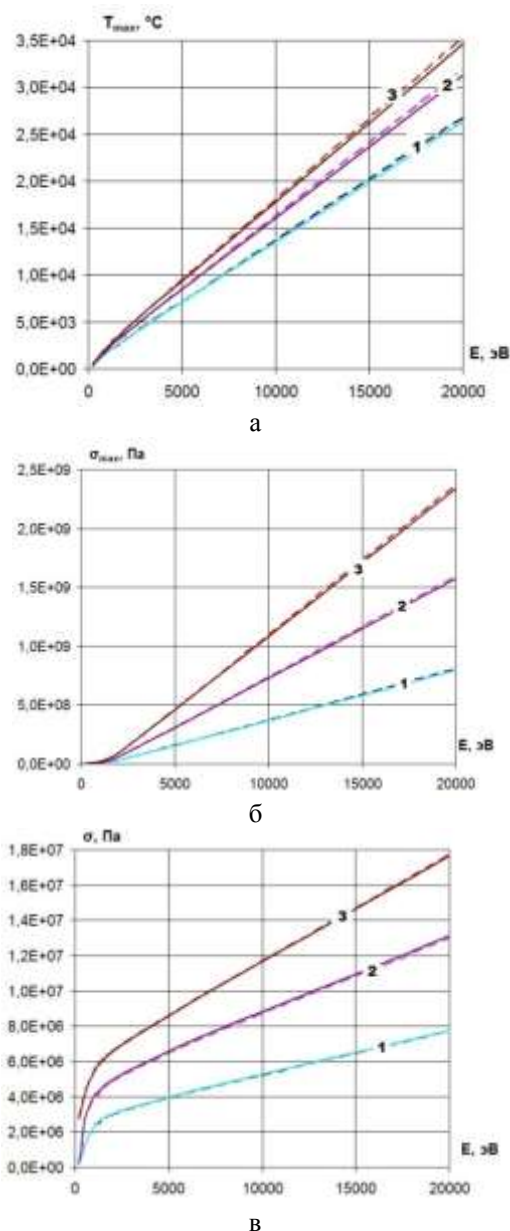


Рис. 5 – Зависимости различных параметров от энергии ионов никеля (–) и кобальта (–) при их действии на магниевые сплавы ($Z = 1$ кривые 1, 2; $Z = 2$ кривые 3, 4; $Z = 3$ кривые 5, 6): а – зависимость максимальных температур; б – зависимость максимальных температурных напряжений; в – зависимость минимальных температурных напряжений

Для минимальных температурных напряжений также значение для ионов никеля и кобальта практически одинаково, максимальное значение составляет $1,75 \cdot 10^7$ Па ($E_i = 2 \cdot 10^4$ эВ, $Z = 3$), тогда как для минимальных энергий (200 эВ) они уменьшаются до $6 \cdot 10^6$ и $2 \cdot 10^6$ Па.

В случае действия ионов иттрия и циркония на магниевый сплав зависимости практически совпадают как для температур, так и для напряжений.

Максимальные температуры реализуются при энергии $2 \cdot 10^4$ эВ и $Z=3$ и составляют $3,7 \cdot 10^4$ К, тогда как при $Z=1$ они уменьшаются до $2,8 \cdot 10^4$ К, для малых энергий (200 эВ) температуры приближаются к 10^3 К, поэтому влияние заряда не ощутимо (рис. 6, а).

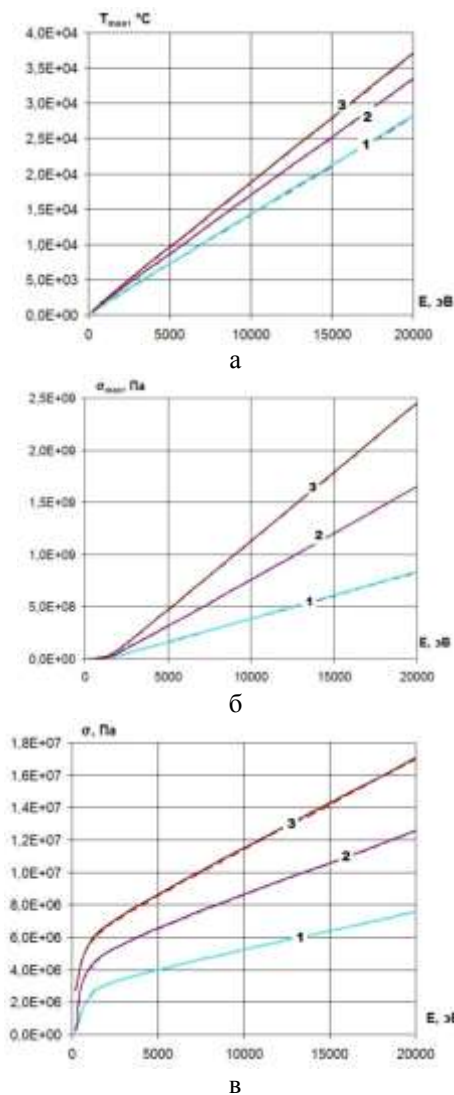


Рис. 6 – Зависимости различных параметров от энергии ионов иттрия (–) и циркония (– –) при их действии на магниевые сплавы ($Z = 1$ кривые 1, 2; $Z = 2$ кривые 3, 4; $Z = 3$ кривые 5, 6): а – зависимость максимальных температур; б – зависимость максимальных температурных напряжений; в – зависимость минимальных температурных напряжений

Максимальные температурные напряжения также одинаковы для ионов иттрия и циркония, максимальные значения которых реализуются при энергии $2 \cdot 10^4$ эВ ($Z = 3$) и составляют $2,4 \cdot 10^9$ Па, а при $Z = 1$ они снижаются до $8 \cdot 10^8$ Па, при малых энергиях (200 эВ) реализуются практически одинаковые температурные напряжения порядка 10^8 Па (рис. 6, б).

Минимальные температурные напряжения при $E_i = 2 \cdot 10^4$ эВ, ($Z = 3$) составляют $1,7 \cdot 10^7$ Па, тогда как при $Z = 1$ они снижаются до $7,6 \cdot 10^8$ Па, при минимальных энергиях 200 эВ влияние заряда незначительно, а температурные напряжения составляют величину порядка $2 \cdot 10^6$ эВ (рис. 6, в).

Действие ионов молибдена и гафния на магниевый сплав приводит к реализации довольно высоких температур при энергиях $2 \cdot 10^4$ эВ. Для гафния они лежат в пределах от $3,7 \cdot 10^4$ до $2,8 \cdot 10^4$ К при зарядах $Z = 3$; $Z = 1$ соответственно, снижение энергий до 200 эВ приводит к реализации температур порядка $2,5 \cdot 10^3$ К практически для всех зарядов.

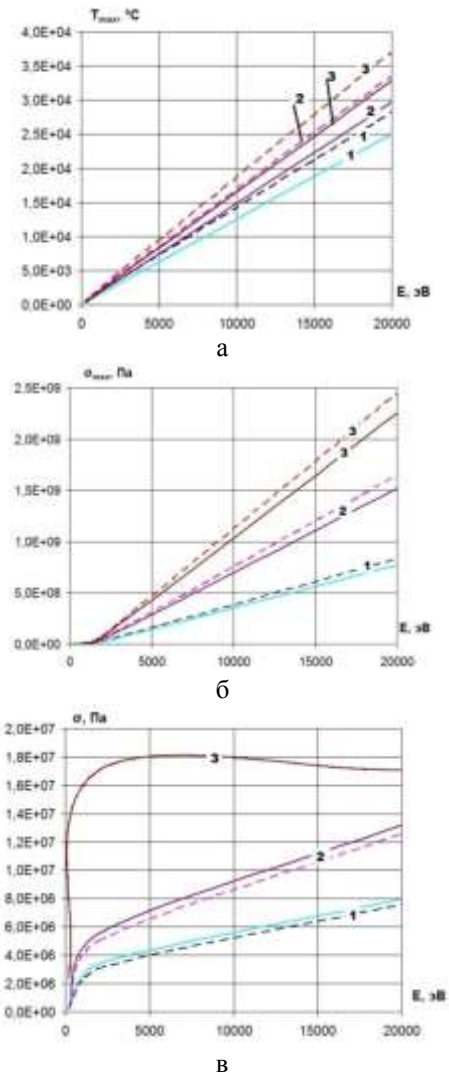


Рис. 7 – Зависимости различных параметров от энергии ионов молибдена (–) и гафния (– –) при их действии на магниевые сплавы ($Z = 1$ кривые 1, 2; $Z = 2$ кривые 3, 4; $Z = 3$ кривые 5, 6): а – зависимость максимальных температур; б – зависимость максимальных температурных напряжений; в – зависимость минимальных температурных напряжений

Для молибдена они несколько ниже и составляют $2,9 \cdot 10^4$, $2,5 \cdot 10^4$ К при соответствующих $Z = 3$; $Z = 1$ (рис. 7, а). Максимальные температурные напряжения для ионов гафния несколько выше, чем для ионов молибдена, и составляют для гафния $2,4 \cdot 10^9$ Па и $7 \cdot 10^8$ Па при соответствующих $Z = 3$; $Z = 1$. Для ионов молибдена реализуются температурные напряжения несколько меньших величин и составляют $2,3 \cdot 10^9$ – $6 \cdot 10^8$ Па при $Z = 3$; $Z = 1$ соответственно (рис. 7, б). Минимальные же значения температурных напряжений при $E_i = 2 \cdot 10^4$ эВ имеют значения $1,72 \cdot 10^7$ и $8 \cdot 10^6$ Па для случая действия ионов молибдена при $Z = 3$; $Z = 1$ соответственно. Причем для этих ионов при энергии порядка 1000 эВ наблюдаются такие же высокие напряжения при $Z = 3$, хотя при $Z = 1$; $Z = 2$ зависимости ведут себя также, как и ионы иттрия и циркония. При малых энергиях минимальные значения напряжений снижаются и уже составляют порядка $1,5 \cdot 10^6$ Па для обоих ионов и зарядов $Z = 1$ и $Z = 3$ (рис. 7, в).

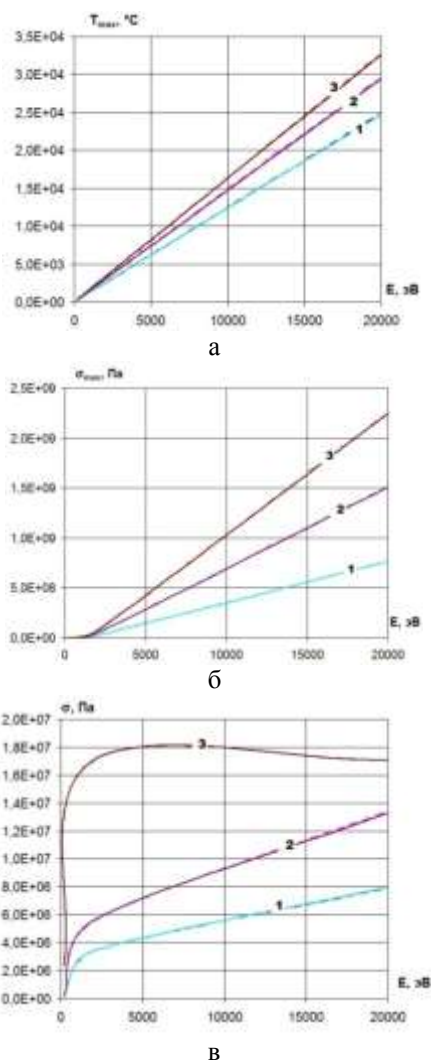


Рис. 8 – Зависимости различных параметров от энергии ионов тантала (—) и вольфрама (---) при их действии на магниевые сплавы ($Z = 1$ кривые 1, 2; $Z = 2$ кривые 3, 4; $Z = 3$ кривые 5, 6): а – зависимость максимальных температур; б – зависимость максимальных температурных напряжений; в – зависимость минимальных температурных напряжений

Действие ионов тантала и вольфрама на магниевые сплавы позволяет реализовать максимальные температуры $(3,25 - 2,5) \cdot 10^4$ К соответственно при ($Z = 3, Z = 1$), причем их значения для обоих ионов практически совпадают.

При минимальных энергиях (200 эВ) влияние заряда нивелируется, а значение лежит вблизи $2 \cdot 10^3$ К (рис 8, а). Температурные напряжения, как для случая действия ионов тантала и вольфрама, одинаковые и лежат в пределах от $2,3 \cdot 10^9$ до $7,5 \cdot 10^8$ Па при $Z = 3$; $Z = 1$. Для малых энергий (200 эВ) они составляют 10^8 Па (рис. 8, б). Температурные напряжения имеют зависимость от энергии, аналогичную предыдущим ионам молибдена и гафния – максимальные значения лежат в диапазоне $1,67 \cdot 10^7 - 8 \cdot 10^6$ Па соответственно при $Z = 3$; $Z = 1$. При $Z = 3$ также наблюдаются высокие значения минимальных температурных напряжений, которые практически равны максимальным для энергий $2 \cdot 10^3$ эВ, но они снижаются до значений 10^6 Па при энергиях 200 эВ, независимо от заряда и сорта иона (рис. 8, в).

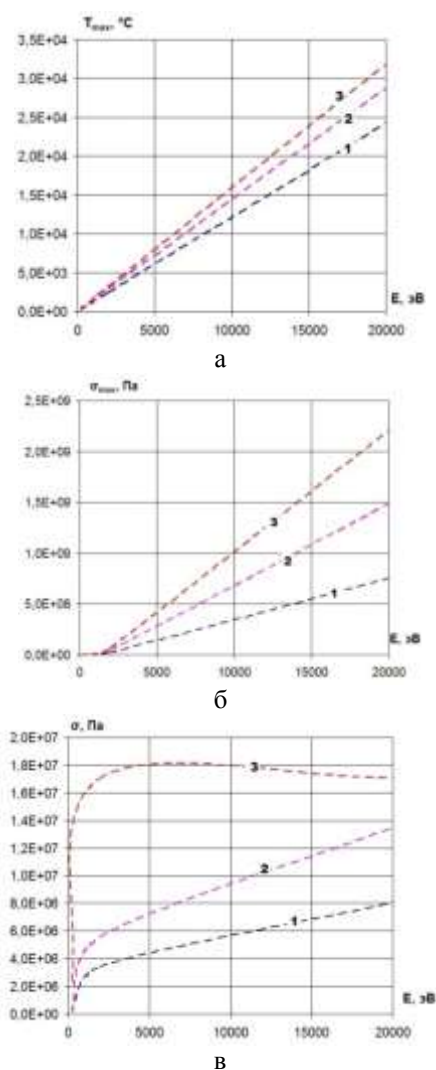


Рис. 9 – Зависимости различных параметров от энергии ионов платины (---) при их действии на магниевые сплавы ($Z = 1$ кривые 1, 2; $Z = 2$ кривые 3, 4; $Z = 3$ кривые 5, 6): а – зависимость максимальных температур; б – зависимость максимальных температурных напряжений; в – зависимость минимальных температурных напряжений

В случае действия ионов платины на магниевые сплавы реализуются температуры порядка $3,2 \cdot 10^4 - 2,4 \cdot 10^4$ К при $Z = 3$; $Z = 1$, тогда как при энергиях 200 эВ температуры составляют порядка 10^3 К для всех зарядов (рис. 9, а). Температурные напряжения в этом случае лежат в диапазоне от $2,2 \cdot 10^9$ до $5,4 \cdot 10^8$ Па при энергии $2 \cdot 10^4$ эВ. При малых энергиях (200 эВ) максимальные температурные напряжения составляют $0,8 \cdot 10^8$ Па практически для всех зарядов (рис. 9, б). Минимальные температурные напряжения имеют зависимости, близкие к молибдену и гафнию – максимальные напряжения составляют величины $2,2 \cdot 10^9$ и $7 \cdot 10^8$ Па для $Z = 3$, $Z = 1$ соответственно (энергия $2 \cdot 10^4$ эВ, рис. 9, в), причем при $Z = 3$ и энергии $2 \cdot 10^3$ эВ также имеем практически максимальные температурные напряжения.

Результаты проведенных исследований можно использовать для оценки возможности получения наноструктур при тех или иных технологических режимах по величине температур, скорости их нарастания и значе-

ниям максимальных и минимальных температурных напряжений, приняв за критерий образование наноструктур, достижение требуемого диапазона температур (500–1500 К), скоростей нарастания температур, больших чем 10^7 К/с и наличие температурных напряжений в диапазоне $10^7 - 10^9$ Па, которые ускоряют процесс получения наноструктур.

Выводы

1. Для широкого круга ионов V^+ , N^+ , C^+ , Al^+ , V^+ , Cr^+ , O^+ , Ni^+ , Zr^+ , Mo^+ , Hf^+ , W^+ , Ta^+ , Pt^+ , действующих на магниевые сплавы, получены зависимость максимальных температур, максимальных и минимальных температурных напряжений от энергии ионов и их заряда, что можно использовать для оценки возможности образования наноструктур при соответствующих технологических режимах обработки.

2. Для ряда ионов получены условия, когда они создают одинаковые температурные поля и поля температурных напряжений, например, ванадий – хром, никель – кобальт, иттрий – цирконий, тантал – вольфрам и платина. Всё это позволяет выбирать наиболее дешевый из ионов для получения тех же наноструктур.

3. Используя в технологии различные энергии ионов, их заряды и сорта, можно получать слои наноструктур размером до 50–60 мкм, что позволит существенно повысить работоспособность деталей и режущего инструмента, использующих такой способ получения наноструктурного слоя.

Список литературы: 1. Костюк, Г.И. Нанотехнологии: выбор технологических параметров и установок, производительность обработки, физико-механические характеристики наноструктур [Текст]: моногр. / Г.И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2014. – 472 с. 2. Костюк, Г.И. Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы [Текст]: моногр. / Г.И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 648 с. 3. Костюк, Г. И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст]: в 2 кн. / Г. И. Костюк. – К.: Изд-во аину, 2002. – 1030 с. 4. Костюк, Г.И. Наноструктуры и нанопокртытия: перспективы и реальность [Текст]: учеб.пособие / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с. 5. Костюк, Г.И. Научные основы создания современных технологий [Текст]: учеб.пособие / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2008. – 552 с. 6. Костюк, Г.И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем [Текст]: моногр.-справ. / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 633 с. 7. Костюк, Г.И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем [Текст]: справ. / Г.И. Костюк. – К.: Вид-во АІНУ, 2003. – 412 с. 8. Костюк, Г.И. Физико-технические основы роботизированного производства

[Текст]: учеб.пособие / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. – 614 с. 9. Гречихин, Л.И. Физика наночастиц и нанотехнологий [Текст] / Л.И. Гречихин. – М.: УП «Технопринт», 2004. – 397 с. 10. Аксенов, И.И. Вакуумная дуга в эрозийных источниках плазмы [Текст] / И.И. Аксенов. – Х.: Изд-во НИИ «ХФТИ», 2005. – 211 с. 11. Гусев, А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии [Текст] / А.И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с. 12. Решетняк, Е.Н. Синтез упрочняющих наноструктурных покрытий [Текст] / Е.Н. Решетняк, А.И. Стрельницкий // Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – № 2. – С. 119 – 130. 13. Андриевский, Р.А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы [Текст] / Р.А. Андриевский // Физика металлов и металловедение. – 2003. – Т. 91, № 1. – С.50 – 56. 14. Состав, структура и свойства наноструктурных пленок боридов тантала [Текст] / А.А. Гончаров, П.И. Игнатенко, В.В. Петухов и др. // ЖТФ. –2006. – Т. 76, вып. 10. – С. 82 – 87.

Bibliography (transliterated): 1. Kostyuk, G.I. Nanotekhnologii: vybor tekhnologicheskikh parametrov i ustanovok, proizvoditel'nost' obrabotki, fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki nanostruktur [Текст]: monogr. / G.I. Kostyuk. - Kiev: Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovatP. tekhnologiy, 2014. - 472 P. 2. Kostyuk, G.I. Nanotekhnologii: teoriya, eksperiment, tekhnika, perspektivy [Текст]: monogr. / G.I. Kostyuk. - Kiev: Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovatP. tekhnologiy, 2012. - 648 P. 3. Kostyuk, G. I. Fiziko-tekhnicheskiye osnovy naneseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy [Текст]: v 2 kn. / G.I. Kostyuk. - Kiev: Izd-vo ainu, 2002. - 1030 P. 4. Kostyuk, G.I. Nanostrukturny i nanopokrytiya: perspektivy i real'nost' [Текст]: ucheb.posobiye / G.I. Kostyuk. - Kharkov. : NatP. aerokosm. un-t «Khark. aviatP. in-t », 2009. - 406 P. 5. Kostyuk, G.I. Nauchnyye osnovy sozdaniya sovremennykh tekhnologiy [Текст]: ucheb.posobiye / G.I. Kostyuk. - Kharkov.: NatP. aerokosm. un-t «Khark. aviatP. in-t », 2008. - 552 P. 6. Kostyuk, G.I. Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem [Текст]: sprav monogr.- / G.I. Kostyuk. - Kharkov: NatP. aerokosm. un-t «Khark. aviatP. in-t », 2007. - 633 P. 7. Kostyuk, G.I. Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem [Текст]: sprav. / G.I. Kostyuk. - Kiev: Vid-vo AІNU, 2003. - 412 P. 8. Kostyuk, G.I. Fiziko-tekhnicheskiye osnovy robotizirovannogo proizvodstva [Текст]: ucheb.posobiye / G.I. Kostyuk. - Kharkov: NatP. aerokosm. un-t «Khark. aviatP. in-t », 2006. - 614 P. 9. Grechikhin, L.I. Fizika nanochastits i nanote-khnologiy [Текст] / L.I. Grechikhin. - Moscow: UP «Tekhnoprint», 2004. - 397 P. 10. Aksenov, I.I. Vakuumnaya duga v eroziyonykh istochnikakh plazmy [Текст] / I.I. Aksenov. - Kharkov: Izd-vo NIИ «KhFTI», 2005. - 211 P. 11. Gusev, A.I. Nanomaterialy, nanostrukturny, nanotekhnologii [Текст] / A.I. Gusev. - Moscow: Fizmatlit, 2005. - 416 P. 12. Reshetnyak, Ye.N. Sintez uprochnyayushchikh nanostrukturnykh pokrytiy [Текст] / Ye.N. Reshetnyak, A.I. Strel'nitskiy // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. - 2008. - No 2. - P. 119 - 130. 13. Andriyevskiy, R.A. Nanomaterialy: kontseptsiya i sovremennyye problemy [Текст] / R.A. Andriyevskiy // Fizika metallov i metallovedeniye. - 2003. - Vol. 91, No 1. - P.50 - 56. 14. Sostav, struktura i svoystva nanostrukturnykh plenok boridov tantala [Текст] / A.A. Goncharov, P.I. Ignatenko, V.V. Petukhov i dr. // ZHTF. -2006. - Vol. 76, No. 10. - P. 82 - 87.

Поступила (received) 05.09.2015

Костюк Геннадий Игоревич – д-р техн. наук, проф., проф. Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Kostyuk Gennadiy Igorevich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Aerospace University "KhAI", tel.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Бехзад Размдзху – аспирант НАУ «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06;

Bekhzad Razmdzhu – graduate student, National Aerospace University "KhAI", тел.: (057)-788-42-06;

Бруяка Ольга Олеговна – канд. техн. наук, доц., доц. Нац. авиацион. ун-т, г. Киев, тел.: (057)-788-42-06

Bruyaka Olha Olehovna – Candidate of Technical Sciences, assistant professor, National Aerospace University, Kiev, tel.: (057)-788-42-06.

УДК 621.95

Г.Л. ХАВИН, И.О. ЕСЫП

ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА НАПОЛНИТЕЛЯ НА КАЧЕСТВО ОТВЕРСТИЙ ПРИ СВЕРЛЕНИИ КОМПОЗИТОВ

Рассмотрено влияние количества наполнителя на шероховатость и расслоение в отверстиях при сверлении многослойных композиционных материалов. Представлен анализ экспериментальных и теоретических исследований образования расслоения и шероховатости в заготовке при сверлении. Описан механизм появления таких дефектов и современное состояние проблемы прогнозирования их количественных характеристик. Проанализировано влияние различных технологических факторов на уменьшение величины дефектов.

Ключевые слова: дефекты сверления, слоистые композиты, шероховатость при сверлении.

Введение. В большинстве приложений главным требованием к сверлению отверстий в композитах является выполнение требований к их качеству. Основная масса отверстий в композитах это крепежные отверстия под заклепки или болтовые соединения различной степени точности. Во многих случаях качество этих соединений определяет прочность или усталостную прочность всего изделия в целом. Поэтому операция сверления композитов должна сопровождаться минимальным появлением различных дефектов с минимальной величиной и безопасной ориентацией.

Помимо дефектов типа расслаивания в композиционных материалах (КМ) при сверлении возникают специфические дефекты, порождаемые их структурной неоднородностью. Даже при работе корректно подобранным острозаточенным инструментом при правильно выбранных значениях технологических параметров возникает волнистость срезанных волокон как результат различного угла взаимодействия инструмента и материала, рис.1. За счет хрупких свойств связующего и наличия в нем микродефектов возникает выкрашивание типа «питтинга» даже в качественно обработанной поверхности, рис.2.

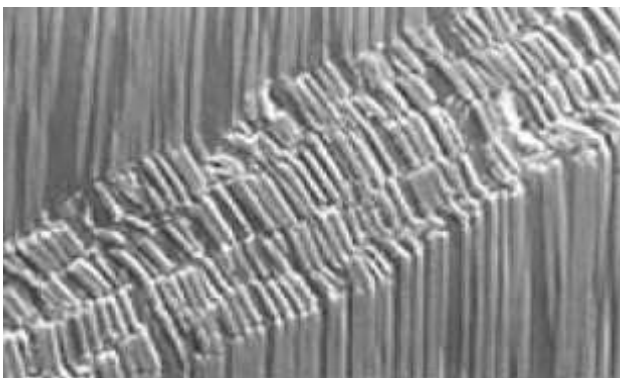


Рис.1 – Волнистость срезанных волокон

Различные дефекты по-разному влияют на ухудшение физико-механических характеристик материала, что проявляется в снижении прочностных характеристик [1,2]. Качество просверленных отверстий в композитах характеризуют как классическими показателями, такими как размерная точность (отклонение размера), погрешность формы отверстия, шеро-

ховатость поверхности стенок, но и специфическими показателями повреждения. К последним относят: расслаивание на входе и выходе инструмента; межслойные трещины; сколы кромок; вытягивание и выдергиванием волокон или жгутов; распушивание и разломачивание; ворсистость; термическая деструкция. Кроме того, при сверлении композитов иногда в отдельный вид нарушения размерной точности относят усадку отверстия после окончания обработки и с течением времени. Наличие перечисленных повреждений приводит к трудностям или даже браку при сборке конструкций, и оказывают негативное влияние на сопротивление усталостной прочности в процессе эксплуатации изделий.

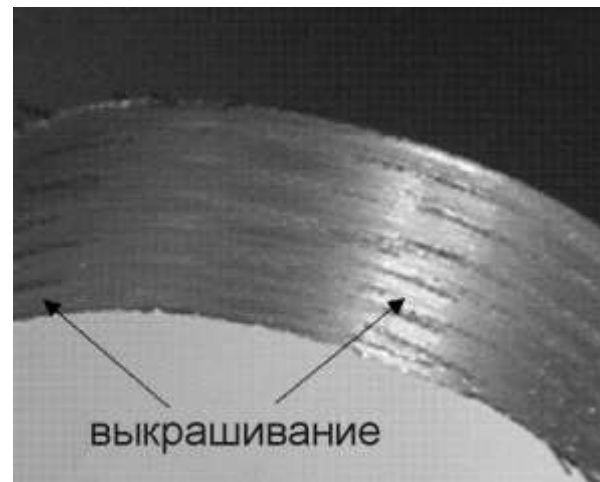


Рис.2 – Выкрашивание связующего и появление в нем дефектов

Наиболее характерными дефектами обработки при сверлении композитов являются ворсистость и распушивание или разломачивание. Под ворсистостью принято понимать количество не срезанных волокон, имеющих характерную высоту выступания над обработанной поверхностью. Считается, что если количество выступающих волокон более 20-30% от общего количества волокон и величина их выступания над поверхностью превышает 4-5 диаметров волокна, то необходимо оценивать ворсистость обработанной поверхности.

Помимо присутствия не срезанных волокон при сверлении может происходить вытягивание волокон

© Г.Л. Хавин, И.О. Есып, 2015

из матрицы, что обусловлено малой адгезией волокон к матрице.

Скол по образующей отверстия чаще всего происходит вследствие повышенной вибрации или биения инструмента при обработке композитов с хрупкой матрицей.

Анализ последних исследований и литературы. По результатам экспериментальных данных, как отмечено в [3,4], при сверлении стекло- и углепластиков инструментом из разных материалов (быстрорежущая сталь, твердый сплав и алмазный инструмент) проявляются почти все виды дефектов. Интенсивность их наличия определяется маркой инструментального материала и режимами сверления. Особенно ярко с увеличением подачи проявляются дефекты типа «разломачивания», сколы и нераскрытые отверстия. Появление этих дефектов связывают также с углом при вершине сверла, в результате воздействия которого часть припуска поверхностного слоя не срезается, а отгибается, скалывается или деформируется наружу [3-5].

Так в работе [6] было показано, что такие процессы разрушения как разрыв волокон на выходе сверла из заготовки и образование локальной пластической деформации увеличивается с увеличением весового (объемного) содержания волокон. Также подтвержден тот факт, что модуль упругости растет линейно с ростом содержания волокон. В [7] представлено экспериментальное исследование сверления тканого перекрестного эпоксидного стеклопластика толщиной 8 мм сверлом из быстрорежущей стали диаметром 8 мм. Использовалось спиральное сверло с углом при вершине 118° и углом наклона спиральной канавки 30° . Содержание стеклянного наполнителя менялось в диапазоне 30, 40, 50, 60 и 70%. В каждой заготовке сверлилось 55 отверстий отдельным инструментом. Скорость вращения шпинделя принималась 470 об/мин, подача – 0,076 мм/об. Данные считывались после сверления 10, 20, 40 и 55 отверстий. Исследовалось влияние количества наполнителя на шероховатость стенок просверленных отверстий и интенсивность изнашивания инструмента.

Прежде всего, авторы выяснили, что для композита с содержанием наполнителя 70% происходит интенсивное разломачивание с сильным разрывом волокон и практически неприемлемым значением шероховатости на стенке отверстия. В связи с этим, в дальнейшем рассматривались заготовки с содержанием 30, 40, 50 и 60% наполнителя.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что величина шероховатости возрастает с увеличением содержания наполнителя и достигает наибольшего значения для 60% содержания. Минимальная шероховатость $R_a = 3,06$ мкм, $R_t = 22,6$ мкм и $R_z = 17,8$ мкм достигается при 30% содержании стеклянного волокна после сверления 10 отверстий. Значения шероховатости быстро растут с увеличением содержанием наполнителя и количеством просверленных отверстий. Эта закономерность объясняется

увеличение износа инструмента с увеличением содержания наполнителя. Для инструмента по мере износа качество поверхности падает.

Каждое выдернутое или разорванное волокно порождает образование вторичных тонких волокон, что подтверждают наблюдения Won и Dharan [8] для сверления кевлар-эпоксидных композитов. Последний факт приводит к низкому качеству поверхности отверстия. Композиты с низким содержанием наполнителя обеспечивают лучшее качество поверхности, но композиты с более высоким содержанием обеспечивают эффект лучшей изоляции концов волокон, что приводит к уменьшению ворсистости и распушивания волокон. На практике влияние количества наполнителя на качество отверстий просверленных в слоистых композитах вполне определяется по расслаиванию на входе и выходе инструмента; поверхностной шероховатости стенок отверстия и характеристикам стружки во время сверления.

Представлен сравнительный анализ осевой силы и качества обработанной поверхности при сверлении однонаправленного эпоксидного стеклопластика с 60% содержанием стеклянных волокон толщиной 10 мм [9]. В экспериментах использовались различные типы сверл. Оптимальные параметры для каждого инструмента определялись по анализу качества отверстия и отклонению величины осевой силы относительно ее средней величины.

В экспериментах использовалось 9 мм сверла из твердого сплава DK560UF(K40) фирмы Promat и быстрорежущей стали, с углом при вершине 118° , стандартной конфигурации, рис.3. Скорость резания принималась равной 50, 100 и 140 м/мин, подача – 0,02, 0,04, 0,08 и 0,16 мм/об.



а



б

Рис.3 – Спиральные сверла: а – сверло из быстрорежущей стали; б – твердого сплава [9]

При сверлении, материал под действием попеременной режущей кромки испытывает изгиб, волокна разламываются и выдергиваются, образуется сетка волосяных трещин в матрице материала. Это находит свое отражение в разрушении связующего и наполнителя, расслоении и уменьшении диаметра отверстия [10].

Цель работы. Целью данной статьи является анализ существующего представления о появлении дефектов качества при сверлении слоистых композиционных материалов с различным содержанием наполнителя, а также влияние при сверлении направления армирования. На основе известных экспериментальных и теоретических исследований образования дефектов поверхности отверстия сделать выводы, и предложить рекомендации по выбору инструмента и технологических параметров сверления. Также обсуждается прогнозирование качественных и количественных характеристик возникающих дефектов и их зависимость от технологических параметров сверления.

Постановка проблемы. Количество наполнителя и порядок его укладки в композитах является априорным фактором, который во многом определяет дальнейшую стратегию обработки отверстия. Знание механических свойств наполнителя в совокупности с его известным весовым или объемным содержанием и порядком расположения (армирования) определяют, прежде всего, выбор типа инструмента, материала режущей части, его геометрию и стойкость.

Механические свойства композита во многом определяются весовым содержанием наполнителя, его типом и укладкой в связующем. Влияние этих факторов, даже при оптимальном выборе технологических параметров обработки, приводит к низкому качеству сверления и интенсивному изнашиванию инструмента. Изучению влияния количества наполнителя и его укладки на качество просверленных отверстий было уделено не так много внимания, как геометрическим параметрам инструмента и параметрам сверления. Однако в последнее время количество исследований неизменно увеличивается, что вызвано, по всей видимости, появлением новых композиционных материалов, усложнением структуры композитов и расширением применения механической обработки.

Результаты исследований. При сверлении заготовок с низким содержанием наполнителя можно видеть длинную вьющуюся стружку. Короткая стружка начинает появляться для заготовок с 50% содержанием стеклоткани, но из-за малой прочности стружка превращается в порошок при перемещении. Далее для 60% стружка становится сегментной и для 70% образуется стружка в виде порошка и пыли. Следовательно, вид образующейся стружки может служить свидетельством качества получаемого отверстия. Для длинной витой стружки получается лучшее качество отверстия. Однако низкое содержание наполнителя в целом не обеспечивает удовлетворительных механических свойств композита, поэтому можно рекомендовать не понижать весовое содержание наполнителя ниже 40%.

Как уже было сказано выше, при сверлении композита происходит разрыв, рассоединение, деформирование и перерезание волокон наполнителя. При этом волокна сминаются и хрупко разрушают-

ся. Исследования Jawali [11] показали, что лучшая связь волокон наблюдается для 40% армирования, что обеспечивает максимальное значение прочности на разрыв.

Для образцов с низким содержанием наполнителя на образование стружки доминирующее влияние оказывают вязкопластические свойства материала. Генерируемое тепло аккумулируется возле вершины инструмента, что приводит к разогреву и высокой температуре, которая порождает пластическое скольжение (сдвиг). В результате появляется длинная витая стружка. В случае высокого содержания наполнителя преобладает упругое хрупкое разрушение волокон. Таким образом, получается сегментный тип стружки. Более подробно механизм резания описан в [12].

Механизм возникновения расслаивания на входе и выходе инструмента достаточно полно описан в литературе. Расслаивание трактуется как следствие вкручивающего и вдавливающего действия сверла. В начальной стадии сверления механизм расслоения обычно носит название поверхностного шелушения. Более серьезные повреждения в виде расслаивания происходят на выходе инструмента. Наиболее действенным способом избежать появления этого дефекта является сверление в подкладную плиту.

Общие выводы по влиянию весового содержания наполнителя на качество просверленных отверстий и изнашивание инструмента состоят в следующем:

- сверление заготовок с 70% содержанием армирования дает неприемлемую шероховатость поверхности стенок отверстия;
- лучшее качество получено для заготовок с 30% содержанием наполнителя, увеличение этой характеристики приводит к ухудшению поверхностной шероховатости, увеличению расслоения на выходе инструмента и образованию вторичного распушивания волокон на перерезанных концах;
- увеличение содержания наполнителя приводит к росту интенсивности изнашивания инструмента за счет увеличения числа контактов вершины инструмента, и термического разогрева материала;
- увеличение содержания наполнителя приводит к ухудшению качества обработанного отверстия на выходе инструмента, разогреву режущих кромок инструмента и текучести материала позади режущих кромок;
- для материала с низким содержанием наполнителя характерен разогрев вершины инструмента, что приводит к пластическому течению материала и порождает длинную вьющуюся стружку, в то время как сверление материала с высоким содержанием наполнителя дает сегментную и пылевидную стружку.

В [13] рассмотрено влияние дополнительного наполнителя TiO₂ и графита на изменение величины осевой силы, крутящего момента и расслаивание при сверлении слоистого эпоксидного стеклопла-

стика. Стеклопластик с 60% содержанием стеклянных волокон содержал 3, 6 и 9% графита и 1, 2 и 3% TiO_2 , и при этом весовое количество связующего оставалось постоянным 40%. Сверление осуществлялось спиральным сверлом из быстрорежущей стали с углом при вершине 118° , с двумя диаметрами – 6,35 мм и 4,7 мм. Частота вращения шпинделя принималась равной 525, 951, 1625 и 2650 об/мин. Анализ полученных экспериментальных данных позволил авторам сделать вывод о том, что увеличение скорости приводит к уменьшению величины осевой силы для обоих диаметров сверл. С ростом содержания материала наполнителя с 1 до 3% TiO_2 и с 3 до 6 % графита осевая сила уменьшается для всех интервалов скоростей и имеет тенденцию к дальнейшему снижению. Расслаивание на выходе уменьшается для высоких скоростей резания в области рассматриваемого диапазона скоростей. Это происходит, вероятнее всего, в результате того, что температура резания возрастает с увеличением скорости шпинделя, следовательно, возникает размягчение матрицы и расслаивание уменьшается. Эффект от добавления наполнителей в виде TiO_2 и графита показал, что повышение процента уменьшает величину расслаивания и осевую силу, что является подтверждением того, что лучшая связь материала связующего с волокнами матрицы приводит к росту мощности усилия разрушения.

В работе [14] также рассматривается сверление эпоксидных стеклопластиков с добавлением наполнителей в виде TiO_2 и ZnP. Показано, что такая модификация (увеличение процентного содержания) увеличивает прочность материала, причем добавление ZnS более эффективно по сравнению с TiO_2 . Анализ сверления таких материалов ступенчатым спиральным сверлом с углом при вершине 118° трех геометрических размеров показал, что лучшие результаты по качеству отверстий дает обработка с меньшим типоразмером. Также были проведены эксперименты по сверлению образцов после их выдержки в морской воде 8, 16 и 24 часа. Лучшую обрабатываемость дали заготовки после 16 часов выдержки в морской воде и добавление ZnS более благоприятно действует на процесс сверления, чем добавление TiO_2 .

В целом, проведенные исследования показали, что для различных типов связующих общие закономерности, связанные с влиянием подачи и частоты вращения на величину осевой силы, сохраняются [15]. Однако, например, эпоксидное связующее обеспечивает меньшее расслаивание на выходе инструмента, чем полиэфирная смола. Причем эта закономерность подтверждается как при использовании укороченного спирального сверла, так и специального инструмента «Brad & Spur». По абсолютной величине осевая сила для эпоксидного связующего несколько выше, чем для полиэфирного, но, как отмечено в [15], при этом фактор расслаивания больше при сверлении образцов из полиэфирного связующего. Использование сверла типа

«Brad & Spur» за счет меньшего значения осевой силы обеспечивает меньшую величину расслаивания на выходе.

Сверление композитов вдоль и под углом к направлению армирования в практических приложениях встречается достаточно редко и, поэтому, особого внимания к изучению этой операции не уделялось. Экспериментальные наблюдения показали, что сверление композитов вдоль и под углом к направлению армирования по своим качественным закономерностям собственно процесса сверления не сильно отличаются от традиционного сверления поперек направления армирования [16,17].

Выводы. Из теории и практики сверления композитов известно, что с увеличением подачи растет осевая сила и это приводит к интенсификации расслаивания на входе и выходе инструмента и росту шероховатости. Это явление характерно практически для всех видов сверл. При этом для сверл из быстрорежущей стали величина возникающих дефектов больше, чем для инструмента из твердого сплава. Лучшее качество поверхности получается при сверлении твердосплавным сверлом практически для всех сочетаний подачи – s и частоты вращения шпинделя – f .

Величина шероховатости независима от типа и формы армирования, типа связующего, метода укладки и изготовления композита для выбранного инструмента, зависит, прежде всего, от сочетания величины подачи s и частоты вращения шпинделя f .

Из представленных физических представлений, величина разрушения вокруг отверстия возрастает с ростом осевой силы и имеет тенденцию к сглаживанию при значительном увеличении осевой силы. Величина дефектов возрастает с увеличением диаметра отверстия и можно предположить, что несоответствие диаметров будет расти более быстро с его увеличением.

Список литературы: 1. Faria P.E. Dimensional and Geometric Deviations Induced by Drilling of Polymeric Composite / P.E. Faria, J.C. Campos Rubio, A.M. Abrao // Journal of Reinforced Plastics and CompositeP. –2009. – V.28, N19. – P. 2353-2364. 2. Lachaud F. Drilling of composite structures / F. Lachaud, R. Piquet, F. Collombet, L. Surcin // Composite StructureP. – 2001. – V.52. – P. 511-516. 3. Мелентьев Р.Ю. Особенности механической обработки полимерных композиционных материалов / Р.Ю. Мелентьев, В.В. Натальчишин // 36. Наук праць НУК.– 2013.– №4.– С. 30-34. 4. Мелентьев Р.Ю. Особенности сверления углепластиков / Р.Ю. Мелентьев., В.В. Натальчишин // Праці Одеського політехнічного університету.– 2014.– 2(44).– С. 27-33. 5. Хавин Г.Л. Образование дефектов при сверлении слоистых композитов и механизм появления расслаивания / Г.Л. Хавин // Вісник НТУ «ХПІ»: Збірник наукових праць. Серія Технологія машинобудування. – Х.: НТУ «ХПІ».–2015.–№4(1113).– С.96-100. 6. Guo D.-M. Prediction of the cutting forces generated in the drilling of carbon-fibre-reinforced plastic composites using a twist drill / D.-M. Guo, Q. Wen, H. Gao, Y.-J. Bao // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2012. –226, N1. – P. 28-42. 7. Lee N.J. Effect of fibre content on the mechanical properties of Glass fibre mat/polypropylene compositeP. Composites Part A / N.J. Lee, J. Jang// Applied Science and Manufacturing. – 1999. – V.30, N6. – P. 815-822. 8. Won M.P. Drilling of aramid and carbon fiber polymer composites / M.P. Won, C.K.H. Dharan // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2002. – V.124, N4. – P. 778-783. 9. Lita A. Influence of tool material on dynamics of

drilling and damage analysis of UD-GFRP composites / A. Lita, C. Bisu, C. Minciu // U.P.B. Sci. Bull., Series D.– 2012. –V. 74, N 3. – P. 169-178. **10.** Arul P., Vijayaraghavan L., Malhotra P.K., Krishnamurthy R. Influence of tool material on dynamics of drilling of GFRP composites / P. Arul, L. Vijayaraghavan, P.K. Malhotra, R. Krishnamurthy // Int. J Adv. Manuf. Technol. –2006. – N29. – P. 655–662. **11.** Jawali D. Physico-mechanical properties, machinability and morphological behaviour of short glass fiber reinforced nylon 6 composites / D. Jawali, B. Sid-deshwarappa, J. Siddaramaiah // Journal of Reinforced Plastics and CompositeP. – 2006. –V.25, N13. – P. 1409-1418. **12.** Velayudham A. Evaluation of drilling characteristics of high volume fraction fibre glass reinforced polymeric composite / A. Velayudham, R. Krishnamurthy, T. Soundarapandian// International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2005. – V.45, N4-5.– P. 399-406. **13.** Muruges M.C., Sadashivappa K. Influence of filler material on glass fiber /epoxy composite laminates during drilling / M.C. Muruges, K. Sadashivappa // International Journal of Advances in Engineering & Technology.– 2012. – Vol. 3, N 1. – P. 233-239. **14.** Patil D.B. Effect of sea water on drilling processes of glass fibre reinforced epoxy composite materials to analysis of delamination factor and thrust force / D.B. Patil, N.C. Vijaykumar // International Journal of Engineering Research and ApplicationP.– 2014. – V.4, N2. – P. 243-249. **15.** Faria P.E. Drilling polymeric matrix composited reinforced with glass fibres / P.E. Faria, M.K. Akama, Abrão, A.M. Reis, J.P. Davim // 18th International Congress of Mechanical Engineering, November 6-11, 2005, Ouro Preto. – P. 365-373. **16.** Devadath V.R. Study of drilled hole surface characteristics in GFRP rod generated by different drill bits / V.R. Devadath, H.P. Raju, B.R. Narendra Babu, N.L. Muralikrishna // International Journal of Emerging trends in Engineering and Development. – 2012. – V.5, N2. – P. 149-155. **17.** Abrao A.M., Faria P. E., Campos Rubio J.C., Reis P., Davim P. J. Drilling of fibre reinforced plastic: A review / A.M. Abrao, P.E. Faria, J.C. Campos Rubio, P. Reis, P.J. Davim // J. Mater. Process Technology. – 2007. – N186. – P. 1-7.

Bibliography (transliterated): 1. Faria P.E. Dimensional and Geometric Deviations Induced by Drilling of Polymeric Composite / P.E. Faria, J.C. Campos Rubio, A.M. Abrao // Journal of Reinforced Plastics and CompositeP. –2009. – Vol.28, No19. – P. 2353-2364. **2.** Lachaud F. Drilling of composite structures / F. Lachaud, R. Piquet, F. Collombet, L. Surcin // Composite StructureP. – 2001. – Vol.52. – P. 511-516. **3.** Melentev R.Yu. Osobennosti mehanicheskoy obrabotki polimernykh kompozitsionnykh materialov / R.Yu. Melentev. V.V. Natalchishin // Zb. Nauk prats NUK.– 2013.– No4.– P. 30-34. **4.** Melentev R.Yu. Osobennosti sverleniya ugleplastikov / R.Yu. Melentev., V.V. Natalchishin // PratsI Odeskogo politehnichnogo unIversitetu.– 2014.– 2(44).– P. 27-33. **5.** Havin G.L. Obrazovanie defektov pri sverlenii sloistykh kompozitov i mehanizm poyavleniya rasslaivaniya / G.L. Havin // VIsnik NTU «HPI»: Zblrnik naukovih pratP. SerIya TehnologIya mashinobuduvannya. – Kharkov: NTU «HPI».–2015.–No4(1113).–P.96-100.

6. Guo D.-M. Prediction of the cutting forces generated in the drilling of carbon-fibre-reinforced plastic composites using a twist drill / D.-M. Guo, Q. Wen, H. Gao, Y.-J. Bao // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2012. –226, No1. – P. 28-42. **7.** Lee N.J. Effect of fibre content on the mechanical properties of Glass fibre mat/polypropylene compositeP. Composites Part A / N.J. Lee, J. Jang// Applied Science and Manufacturing. – 1999. – Vol.30, No6. – P. 815-822. **8.** Won M.P. Drilling of aramid and carbon fiber polymer composites / M.P. Won, C.K.H. Dharan // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2002. – Vol.124, No4. – P. 778-783. **9.** Lita A. Influence of tool material on dynamics of drilling and damage analysis of UD-GFRP composites / A. Lita, C. Bisu, C. Minciu // U.P.B. Sci. Bull., Series D.– 2012. –Vol. 74, No 3. – P. 169-178. **10.** Arul P., Vijayaraghavan L., Malhotra P.K., Krishnamurthy R. Influence of tool material on dynamics of drilling of GFRP composites / P. Arul, L. Vijayaraghavan, P.K. Malhotra, R. Krishnamurthy // Int. J Adv. Manuf. Technol. –2006. – No29. – P. 655–662. **11.** Jawali D. Physico-mechanical properties, machinability and morphological behaviour of short glass fiber reinforced nylon 6 composites / D. Jawali, B. Sid-deshwarappa, J. Siddaramaiah // Journal of Reinforced Plastics and CompositeP. – 2006. –Vol.25, No13. – P. 1409-1418. **12.** Velayudham A. Evaluation of drilling characteristics of high volume fraction fibre glass reinforced polymeric composite / A. Velayudham, R. Krishnamurthy, T. Soundarapandian// International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2005. – Vol.45, No 4-5.– P. 399-406. **13.** Muruges M.C., Sadashivappa K. Influence of filler material on glass fiber /epoxy composite laminates during drilling / M.C. Muruges, K. Sadashivappa // International Journal of Advances in Engineering & Technology.– 2012. –Vol. 3, No 1. – P. 233-239. **14.** Patil D.B. Effect of sea water on drilling processes of glass fibre reinforced epoxy composite materials to analysis of delamination factor and thrust force / D.B. Patil, N.C. Vijaykumar // International Journal of Engineering Research and ApplicationP.– 2014. – Vol.4, No 2. – P. 243-249. **15.** Faria P.E. Drilling polymeric matrix composited reinforced with glass fibres / P.E. Faria, M.K. Akama, Abrão, A.M. Reis, J.P. Davim // 18th International Congress of Mechanical Engineering, November 6-11, 2005, Ouro Preto. – P. 365-373. **16.** Devadath V.R. Study of drilled hole surface characteristics in GFRP rod generated by different drill bits / V.R. Devadath, H.P. Raju, B.R. Narendra Babu, N.L. Muralikrishna // International Journal of Emerging trends in Engineering and Development. – 2012. – Vol. 5, No 2. – P. 149-155. **17.** Abrao A.M., Faria P. E., Campos Rubio J.C., Reis P., Davim P. J. Drilling of fibre reinforced plastic: A review / A.M. Abrao, P.E. Faria, J.C. Campos Rubio, P. Reis, P.J. Davim // J. Mater. Process Technology. – 2007. – No 186. – P. 1-7.

Поступила (received) 28.10.2015

Робота виконана по проекту M2133Ф фінансированого Министерством образования и науки Украины.

Хавин Геннадий Львович – канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПИ», тел.: (057)-720-66-25, e-mail: gennadiy.khavin@mail.ru;

Khavyn Hennadyi Lvovych – Candidate of Technical Sciences, assistant professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25, e-mail: gennadiy.khavin@mail.ru;

Есип Инна Олеговна – магистрант, НТУ «ХПИ», тел.: (057)-720-66-25.

Esyp Ynna Olehovna – undergraduate, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25.

УДК 681.518.3

О.Ф. ЄНІКЄВ, Ф.М. ЄВСЮКОВА, О.Ю. ПРИХОДЬКО

АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ДВОХСТУПІНЧАСТОЇ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ПОКООРДИНАТНОГО ЗАДАВАННЯ ПАРАМЕТРІВ АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ

На основі ієрархічного принципу, методів безпосереднього цифрового та покоординатного управління, непрямих вимірювань якості поверхні деталі з використанням сигналу девіацій швидкості обертання шліфувального круга розроблено тривимірну двохступінчасту інформаційно-вимірювальну систему покоординатного задавання параметрів алмазного шліфування. Побудовано математичні моделі апаратних засобів з використанням дискретного перетворення Лапласа. Мінімізацією квадратичного критерію якості з використанням еталонних моделей каналів інформаційно-вимірювальної системи отримано передатні функції пристроїв обробки вхідної інформації. Складено схеми комп'ютерного моделювання процесів перетворення апаратними засобами інформаційно-вимірювальної системи вхідних сигналів. Встановлено ефективність апаратних засобів, які розроблено.

Ключевые слова: апаратні засоби, інформаційно-вимірювальна система, непрямі вимірювання, комп'ютерне моделювання.

Вступ. Інформаційно-вимірювальні системи (ІВС) знайшли використання у машинобудівному виробництві України при упровадженні сучасних інформаційних та енергозберігаючих технологій для підвищення економічної ефективності технологічних процесів, зокрема алмазного шліфування (АШ). Застосування відомих апаратних засобів має мету скоротити час обробки деталі та отримати задану шорсткість поверхні [1]. Одновимірні системи реалізують традиційні технології автоматизації процесу АШ. Їхнє програмне забезпечення розв'язує задачі задавання оптимальних технологічних параметрів, які зберігає банк даних у вигляді програми обробки партії деталей. При цьому не використовується інформація про поточну якість поверхні деталі, оскільки отримати цей сигнал шляхом прямих вимірювань неможливо у зв'язку з відсутністю відповідних первинних перетворювачів. Ця обставина робить неефективним використання відомих ІВС.

Метою статті є розробка ефективних апаратних засобів ІВС покоординатного задавання параметрів АШ в умовах неповної інформації та дії завад. Для досягнення поставленої мети розв'язано такі завдання:

- розробка програмних рухів ІВС зі скорочення часу обробки деталі та забезпеченню потрібного «якості» чистоти поверхні;
- побудова на основі принципу децентралізації структурної схеми ІВС;
- математичне моделювання апаратних засобів з урахуванням факторів невизначеності, які обумовлено дією завад та похибками вимірювань вхідних сигналів;
- побудова пристроїв обробки сигналів.

Розробка архітектури інформаційно-вимірювальної системи. Інформаційне забезпечення системи подано в такому вигляді:

- $\bar{U} = (u_1, u_2, \dots, u_i)^T$ - вектор вихідних сигналів;
- $\bar{X} = (S_{\bar{w}}, S_{\bar{n}\bar{a}\bar{c}}, \omega_{\bar{e}\bar{d}})^T$ - вектор вхідних сигналів;
- $\bar{Q} = (\Delta_{\bar{a}\bar{d}}, S_{\bar{w}\bar{w}\bar{a}\bar{d}}, S_{\bar{n}\bar{a}\bar{c}\bar{w}\bar{d}}, \omega_{\bar{e}\bar{d}\bar{w}\bar{d}})^T$ - вектор уставок банку даних процесу АШ;

- $\bar{\xi} = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k)^T$ - вектор завад;
- $F(\bar{U}, \bar{Q}, \bar{\xi}, \Delta\omega, P_{\bar{a}}, \omega_{\bar{e}\bar{d}}) = \bar{Y}$ - математична модель програмних рухів апаратних засобів ІВС в умовах неповної інформації та дії завад;
- $F_k(u_k, \bar{Q}_k, \bar{\xi}_k) = 0$ - математична модель перетворення каналом вхідної інформації.

Сила різання матеріалу заготівлі утворює збурювання, яке є джерелом крутильних коливань. Вал зі встановленим на ньому шліфувальним кругом (ШК) подано механічною системою з одним ступенем волі. Рух маси цієї системи описано таким інтегродиференціальним рівнянням

$$J_{\bar{e}\bar{d}}\Delta\omega'(t) + \beta_1\Delta\omega(t) + \frac{\gamma_1}{t_1} \int_0^{t_1} \Delta\omega(t) dt = RF(t), \quad (1)$$

де $J_{\bar{e}\bar{d}}$ – момент інерції ШК, $\Delta\omega(t)$ – девіації, β_1 – коефіцієнт демпфування, γ_1 – крутильний опір валу, $\varphi(t)$ – кут закрутки, $F(t)$ – сила різання, R – радіус круга. Це рівняння встановлює інформаційний зв'язок між девіаціями швидкості обертання ШК та силою різання матеріалу заготівлі.

В основу розробки архітектури ІВС покладено: мікроконтролер МС68HC912B32, методи безпосереднього цифрового та покоординатного управління, ієрархічний принцип, непрямі вимірювання мікронерівностей та різальних властивостей ШК, а також принципи децентралізації та мультиплексування шин адреси та даних. Структурна схема двохвимірної триступеневої ІВС подана на рис. 1. На рисунку позначено так: П – перетворювач; ВМ – виконуючий механізм; ЕП – електричний привод; Д – датчик; ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач.

Інформаційний зв'язок між ІВС та процесом АШ забезпечують сигнали подачі та швидкості обертання круга. Апаратні засоби першої ступені системи задають параметри АШ, які зберігає банк даних у вигляді відповідного вектора. Вихідні сигнали формуються ними під час прямої або зворотної ходи ШК.

Сигнал миттєвої швидкості обертання алмазного інструмента є вхідним для апаратних засобів другої ступені.

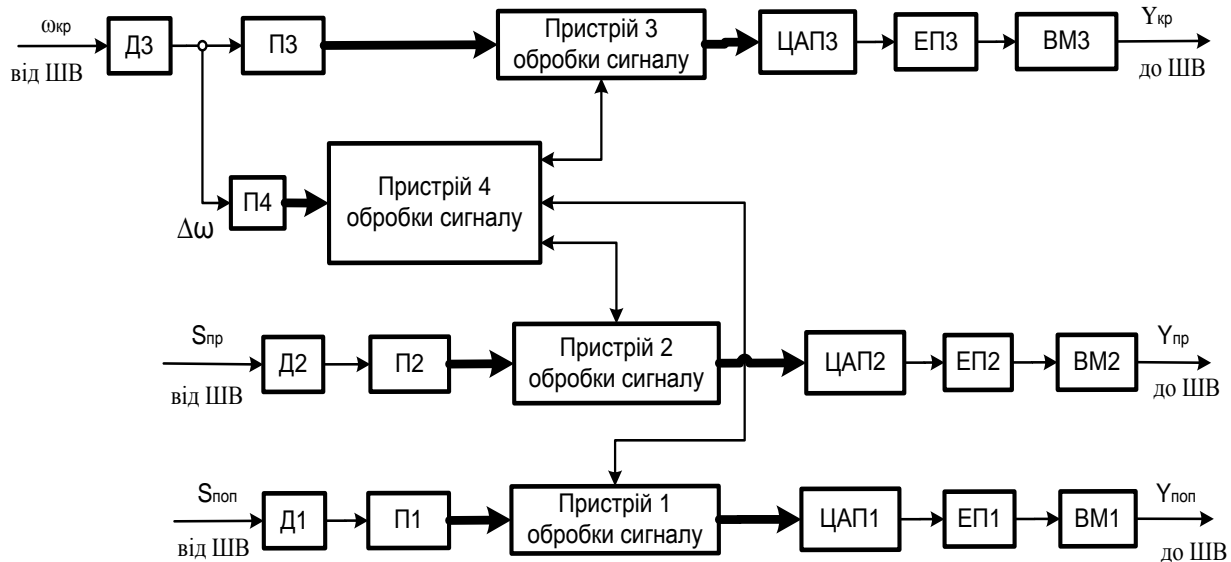


Рисунок 1 – Архітектура ІВС

Пристрій 4 на основі прямих вимірювань миттєвої швидкості та за допомогою інформаційної технології обробки цього сигналу визначає мікронерівності поверхні деталі, амплітуда яких прогнозується. Алгоритм обробки сигналу швидкості складається з таких обчислювальних процедур: виділення сигналу девіацій та подання його обмеженим рядом Фур'є; визначення діючого значення та його порівняння з еталонним рівнем, котрий встановлено програмою обробки партії деталей. Якщо амплітуда можливих мікронерівностей перевищує рівень, який задано прийнятим «якітетом» чистоти поверхні деталі, то пристрій 4 аналізує банк даних та формує сигнали коригування подачі. Обробка цих сигналів виконується пристроями 1, 2 та 3 під час пауз між прямою та зворотною ходю алмазного інструменту. ВМ1-ВМ3 задають нові параметри АШ.

Моделювання каналів інформаційно-вимірювальної системи. У результаті аналізу структурної схеми блоку ЕПЗ разом із ВМ3 та математичних перетворень отримано передатну функцію [1]

$$W_1(p) = \frac{k_y k_z K_{uin} K_{ms} (T_{oc} p + 1) k_M p}{[e^{\tau_{uin} p} e^{\tau_{ms} p} (T_{uin} p + 1) (T_{ms} p + 1) (T_{oc} p + 1) (T_E p + 1) + 1] (T_M p + 1)}, \quad (2)$$

де K_i, T_i – відповідно коефіцієнти передачі та постійні часу елементарних ланок математичної моделі. Досліджено частотні характеристики блоків ЕПЗ та ВМ3 і в результаті обробки дослідних даних встановлено, що він задовольняє вимогам ІВС за величиною похибки.

У результаті аналізу структурної схеми апаратних засобів обробки сигналу швидкості та математичних перетворень отримано передатну функцію в такому вигляді [1]

$$W_2(p) = \frac{b_0^* \tau_r p [T_3 \tau_3 p^2 + (T_3 + \tau_3) p + 1]}{a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1}, \quad (3)$$

$$\text{де } a_4 = T_1 T_2 T_3 \tau_3, \quad a_3 = T_1 T_2 (T_3 + \tau_3) + (T_1 + T_2) T_3 \tau_3, \\ a_2 = T_1 T_2 + T_3 \tau_3 + \tau_r + (T_1 + T_2) (T_3 + \tau_3), \quad a_1 = T_1 + T_2 + T_3 + \tau_3.$$

Визначено z-перетворення передатних функцій блоків ЕПЗ та ВМ3. Математичну модель завади, яка діє на виході каналу обробки сигналу швидкості, подано у вигляді гармонійного лінійного випадкового процесу. Визначено його характеристики та на основі їхнього аналізу встановлено коректність моделі. Процедuru обробки апаратними засобами вхідного сигналу розроблено на основі принципу управління за відхиленням та подано в такому вигляді

$$C(z^{-1}) \psi_i^* = f_0 y_i + f_1 y_{i-1} + g_0 u_i + g_1 u_{i-1} + g_2 u_{i-2} + g_3 u_{i-3} + h_0 G_i + h_1 G_{i-1} + \delta = 0, \quad (4)$$

де δ – припустиме значення похибки апаратних засобів.

У результаті математичних перетворень останнього виразу отримано сигнал, який формує пристрій 3 на ЕПЗ в кожний період дискретизації

$$u_i = -g_0^{-1} \left(f_0 y_i + f_1 y_{i-1} + g_1 u_{i-1} + g_2 u_{i-2} + g_3 u_{i-3} + h_0 G_i + h_1 G_{i-1} + \delta \right). \quad (5)$$

Мінімізацією квадратичного критерію якості з використанням еталонної моделі каналу отримана передатна функція пристрою 3 обробки сигналу швидкості в такому вигляді [1]

$$W_{f3}(z) = 1.206 \frac{z^2 - 0.1706z}{z^2 - 0.995z - 5.019 \cdot 10^{-3}}. \quad (6)$$

На основі виразів (3) та (6) розроблено схему комп'ютерного моделювання процесу обробки апаратними засобами сигналу швидкості обертання ШК (рис. 2).

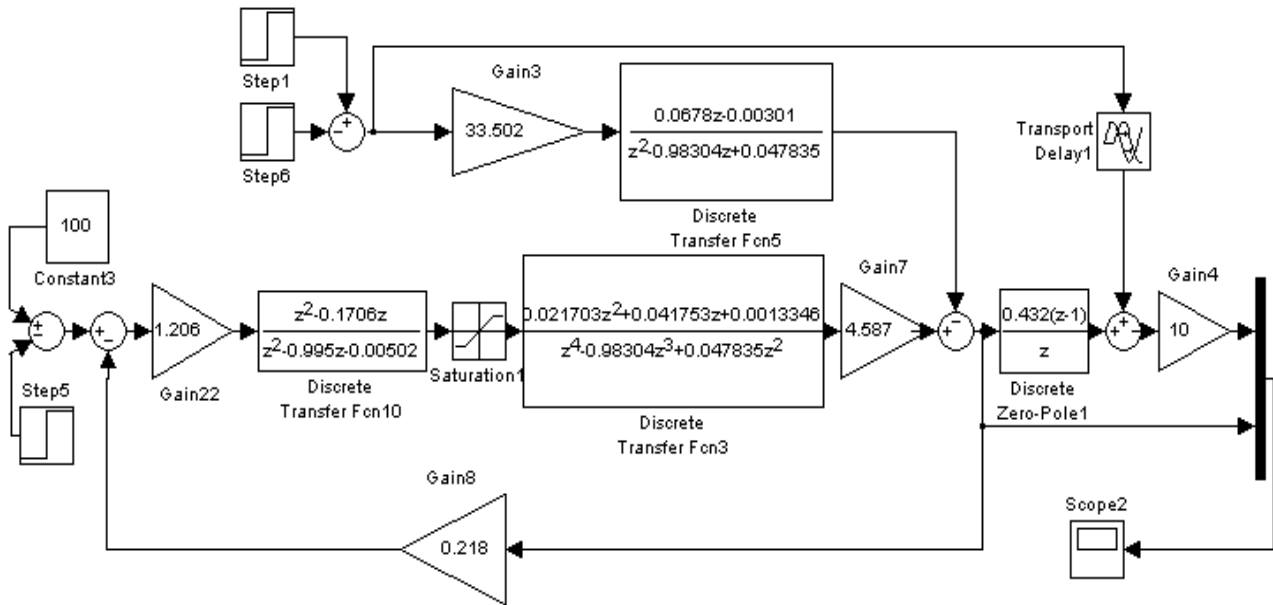


Рисунок 2 – Схема комп’ютерного моделювання процесу обробки сигналу швидкості обертання ШК

Отримано сигнали кутової швидкості обертання круга та струму обмотки збудження двигуна у функції часу.

З урахуванням смуги (Δ_1) нечутливості первинного перетворювача, яку визначено в результаті статистичної обробки дослідних даних, отримана передатна функція блоків Д1 та П1 в такому вигляді [2]

$$W_3(p) = \frac{\Delta_1 k_{i1} e^{-p\tau_{i1}}}{T_{i1} p + 1} \quad (7)$$

У результаті аналізу схеми побудови та математичних перетворень отримали таку передатну функцію ЕП1 разом з ВМ1 [2]

$$W_4(p) = \frac{k_y k_3 K_{uin} K_{me} (T_{oc} p + 1) k_M}{[e^{T_{uin} p} e^{T_{me} p} (T_{uin} p + 1)(T_{me} p + 1)(T_{oc} p + 1)(T_E p + 1) + 1](T_M p + 1)} \quad (8)$$

Аналіз нулів та полюсів передатної функції дозволив без суттєвих втрат точності подати його в такому вигляді

$$W_5(p) = \frac{b_0^*}{(c_1 T_4 p + 1) \left(\frac{T_4}{c_1} p + 1 \right) (T_5 p + 1)} \quad (9)$$

Вхідний сигнал каналу обробки сигналу поперечної подачі ШК подано у вигляді обмеженого ряду Фур’є

$$S_{ivi}(t) = \sum_{k=1}^n A_{2k-1} \{ e^{j[(2k-1)\Omega t - 0.5\pi]} - e^{-j[(2k-1)\Omega t - 0.5\pi]} \}, \quad (10)$$

де $A_{2k-1} = \frac{4S_{ivi}}{\pi(2k-1)} \cos\left[\frac{(2k-1)\Omega}{2}(t_1 - t_2)\right]$; Ω – кругова частота першої гармоніки.

На основі теореми про згортку з використанням передатної функції каналу отримано вираз, який описує його вихідний сигнал [2]

$$y_{non}(t) = \sum_{k=1}^4 B_k e^{-p_k t} \sum_{i=1}^n \frac{2A_{2i-1} T_k}{\sqrt{1 + T_k^2 (2i-1)^2 \Omega^2}} \times e^{j[0.5\pi - \arctg T_k (2i-1)\Omega]} \quad (11)$$

Визначено z-перетворення передатних функцій ЕП1 разом із ВМ1. Математичну модель випадкової завади, яка діє на виході каналу, подано у вигляді флікер-шуму. Виконано аналіз характеристик цього випадкового процесу та встановлено його придатність для подання. На основі принципу управління за відхиленням процедуру обробки сигналу поперечної подачі круга подано в такому вигляді

$$b_0^o U_t = R_1(z^{-1}) y_{m,t+d+1} - F(z^{-1}) y_t - [D(z^{-1}) - b_0^o] U_t \quad (12)$$

де $y_{m,t+d+1}$ – вихідний сигнал апаратних засобів обробки сигналу поперечної подачі ШК, який прогнозується; ступеневі поліноми

$$R_1(z^{-1}) = \frac{\Delta_2 k_i T_i (1 - l_4)}{\varepsilon_{ivi}} z^{-1},$$

$$D(z^{-1}) = g_0 + g_1 z^{-1} + g_2 z^{-2}, \quad F(z^{-1}) = f_0 + f_1 z^{-1} + f_2 z^{-2}.$$

Мінімізацією квадратичного критерію якості з використанням еталонної моделі каналу отримана передатна функція пристрою 1 обробки сигналу поперечної подачі ШК [2]

$$W_{i1}(z^{-1}) = 767.113 \frac{2.3 - 3.453z^{-1} + 1.33z^{-2}}{0.262 + 0.008z^{-1} + 0.2182z^{-2}} \quad (13)$$

На основі виразів (9) та (13) розроблено схему комп’ютерного моделювання процесу обробки сигналу поперечної подачі ШК (рис. 3).

У результаті аналізу структурної схеми апаратних засобів обробки сигналу поздовжньої подачі кру-

га із застосуванням комп'ютерного моделювання та математичного апарату z-перетворень отримано наступні вирази для передатних функцій [3]

$$W_6(z^{-1}) = z^{-2} \frac{b_1^{\circ} z^{-1} + b_2^{\circ} z^{-2} + b_3^{\circ} z^{-3}}{1 + a_1^{\circ} z^{-1} + a_2^{\circ} z^{-2} + a_3^{\circ} z^{-3}},$$

$$W_7(z^{-1}) = \frac{k_j z^{-1} [1 - T_j + (T_j - l_4) z^{-1}]}{1 - (1 + l_8) z^{-1} + l_8 z^{-2}}.$$

У цих виразах враховано запізнення, яке вносять блок П2, екстраполятор та ЕП2. Також враховано смугу нечутливості первинного перетворювача, яку визначено в результаті статистичної обробки дослідних даних.

Сигнал поздовжньої подачі ШК подано обмеженим рядом Фур'є. На основі теореми про згортку з використанням передатної функції каналу отримано вираз, який описує його вихідний сигнал [3]

$$y_{noo}(t) = \sum_{k=5}^8 B_k e^{-\rho_k t} \sum_{i=1}^n \frac{B_{2i-1} T_k}{\sqrt{1 + T_k^2 (2i-1)^2 \Omega^2}} [e^{j \arctg T_k (2i-1) \Omega} - e^{-j \arctg T_k (2i-1) \Omega}]. \quad (14)$$

Математичну модель випадкової завади апаратних засобів обробки сигналу поздовжньої подачі шліфувального круга подано у вигляді флікер-шуму, який діє на виході. Виконано аналіз характеристик цього випадкового процесу та встановлено його придатність для подання. Мінімізацією квадратичного критерію якості з використанням еталонної моделі апаратних засобів отримана передатна функція пристрою 2 обробки сигналу поздовжньої подачі ШК в такому вигляді [3]

$$W_{Y_2}(z^{-1}) = \frac{0.04752 + 0.862z^{-1} - 0.823z^{-2}}{0.374 - 0.374z^{-1}}. \quad (15)$$

На основі виразу (15) розроблено схему комп'ютерного моделювання процесу обробки сигналу поздовжньої подачі ШК (рис. 4).

У результаті аналізу структурної схеми апаратних засобів оцінювання прогнозованих мікронерівностей

стей із використанням моделей його компонентів та математичного апарату z-перетворень отримано вираз для передатної функції [3]

$$W_{33}(z^{-1}) = \frac{b_1^* z^{-1}}{1 + a_1^* z^{-1} + a_2^* z^{-2}}, \quad (16)$$

$$\text{де } b_1^* = \frac{\Delta_5 k_{a3} k_{j4}}{\tau_{j4} - T_{a3}} \left(e^{-\frac{T_0}{\tau_{j4}}} - e^{-\frac{T_0}{T_{a3}}} \right), \quad a_2^* = e^{-\left(\frac{T_0}{T_{a3}} + \frac{T_0}{\tau_{j4}} \right)},$$

$$a_1^* = - \left(e^{-\frac{T_0}{\tau_{j4}}} + e^{-\frac{T_0}{T_{a3}}} \right).$$

Враховано запізнення апаратних засобів та похибка вимірювань девіацій.

На основі теореми про згортку з використанням передатної функції апаратних засобів оцінювання мікронерівностей отримано вираз, який описує вихідний сигнал [3]

$$y_{p2}(t) = B_9 e^{-\frac{1}{T_{16}} t} \sum_{k=1}^{10} \frac{A_k T_{16}}{\sqrt{1 + T_{16}^2 k^2 \Omega^2}} \left[\frac{e^{j(\psi_k + 0.5\pi - \arctg T_{16} k \Omega)} - 1}{-e^{-j(\psi_k + 0.5\pi + \arctg T_{16} k \Omega)}} \right] +$$

$$+ B_{10} e^{-\frac{1}{T_{17}} t} \sum_{k=1}^n \frac{A_k T_{17}}{\sqrt{1 + T_{17}^2 k^2 \Omega^2}} \left[\frac{e^{j(\psi_k + 0.5\pi - \arctg T_{17} k \Omega)} - 1}{-e^{-j(\psi_k + 0.5\pi + \arctg T_{17} k \Omega)}} \right]. \quad (17)$$

Мінімізацією квадратичного критерію якості з використанням еталонної моделі апаратних засобів отримана передатна функція пристрою 4 обробки сигналу миттєвої швидкості в такому вигляді [3].

$$W_{Y_4}(z^{-1}) = \frac{1.54 - 2.096z^{-1} + 0.616z^{-2}}{2.574 + 0.083z^{-1} - 2.156z^{-2}}. \quad (18)$$

На основі виразів (16) та (18) розроблено схему комп'ютерного моделювання процесу перетворення інформації апаратними засобами оцінювання мікронерівностей (рис. 5).

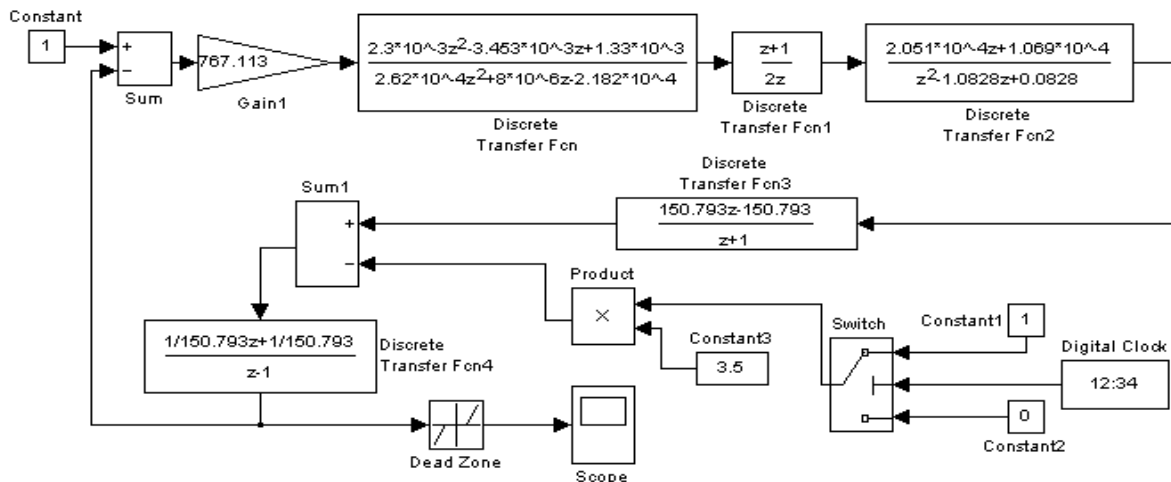


Рисунок 3 – Схема комп'ютерного моделювання процесу обробки сигналу поперечної подачі ШК

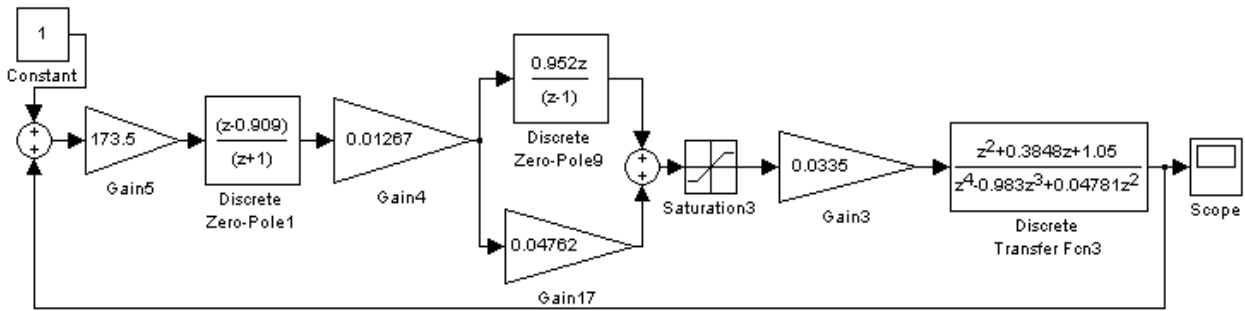


Рисунок 4 – Схема комп’ютерного моделювання процесу обробки сигналу поздовжньої подачі ШК

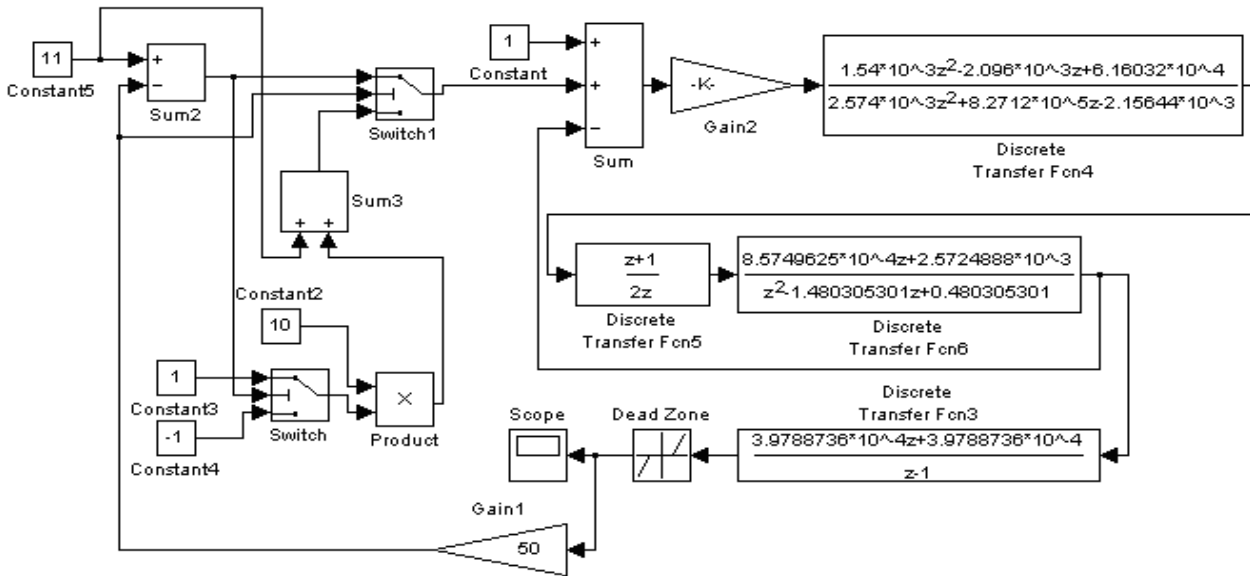


Рисунок 5 – Схема комп’ютерного моделювання процесу перетворення інформації апаратними засобами оцінювання мікронерівностей

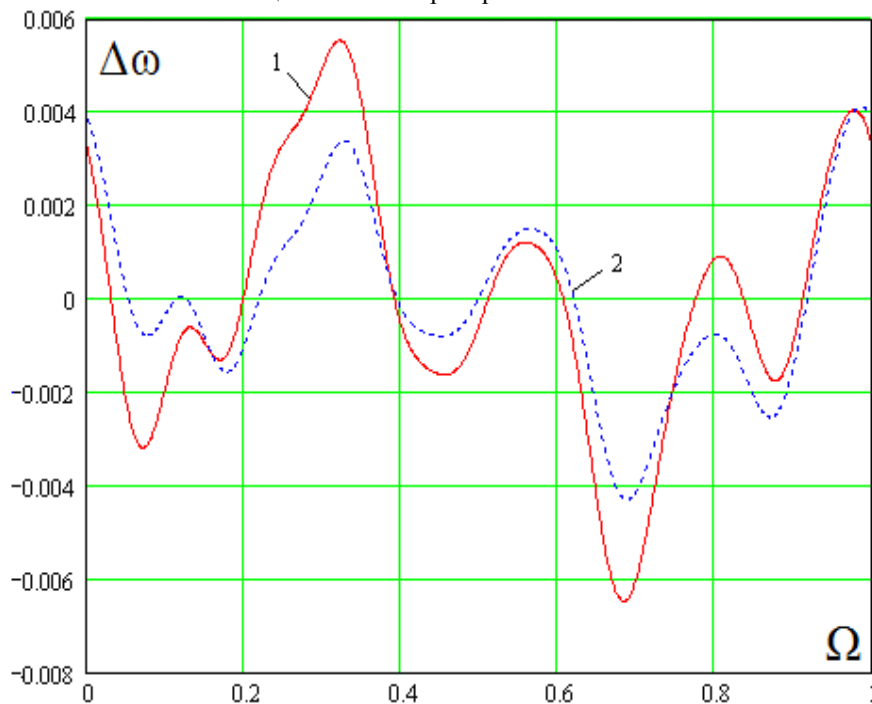


Рисунок 6 – Графіки внесків подач до сигналу девіацій:
1 – поперечної подачі, 2 – поздовжньої

Інформаційна технологія поділу внесків подач до вимірювальної часової реалізації девіацій швидкості обертання круга розроблено на основі частотного подання вказаних сигналів. Передатні функції внесків подач до сигналу девіацій отримано з аналізу математичної моделі процесу АШ в такому вигляді [1]

$$W_{\text{ш}}(p) = \frac{K_n T_{13} b_1 p^2}{(T_{11} p + 1)(T_{12} p + 1)(T_{14} p + 1)(T_{15} p + 1)},$$

$$W_{\text{шс}}(p) = \frac{K_n T_{13} b_0 p}{(a_1 p + a_0)(T_{14} p + 1)(T_{15} p + 1)}.$$

За допомогою цих виразів комп'ютерним моделюванням отримано графіки внесків подач до сигналу девіацій (рис. 6). Визначено вагові коефіцієнти поділу внесків подач.

На основі допускового контролю сигналу девіацій розроблено такий алгоритм формування пристроєм 4 уставок для пристроїв 1, 2 та 3 обробки сигналів:

- часову реалізацію сигналу девіацій після нормалізації його параметрів подаємо обмеженим рядом Фур'є;
- визначаємо діюче значення сигналу девіацій;
- нормовані значення подач одержуємо шляхом множення діючого значення сигналу девіацій на відповідний ваговий коефіцієнт;
- аналізуємо банк даних про еталонні рівні амплітуд девіацій і за потреби виконуємо коригування величин подач.

Розроблено прикладне програмне забезпечення та бази даних ІВС. **Висновок.** Програмні рухи апаратних засобів ІВС зі скорочення часу обробки деталі та отримання прогнозованих мікронерівностей використовує непрямі вимірювання шорсткості та

різальні властивості ШК. На основі методів безпосереднього цифрового та покоординатного управління, принципів децентралізації та розпаралелювання процесів обробки вхідної інформації розроблено тривимірну двохступеневу структуру ІВС. Встановлено структурно-алгоритмічні зв'язки між компонентами та принципи роботи апаратних засобів ІВС. На основі еталонних моделей каналів, які мають відоме запізнення, мінімізацією квадратичного критерію якості розроблено апаратні засоби обробки сигналів. З використанням математичного апарату дискретного перетворення Лапласа побудовано схеми комп'ютерного моделювання процесів обробки інформації апаратними засобами. У результаті комп'ютерного моделювання встановлено, що апаратні засоби відповідають вимогам ІВС з продуктивності.

Список літератури: 1. Енікеєв А.Ф. Оптимальное управление технологическим процессом алмазного шлифования. – Краматорск: ДГМА, 2001. – 160 с. 2. Синтез цифрового регулятора поперечної передачі шліфувального круга / Енікеєв О.Ф., Зиков І.С. // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – Харьков: №57, 2008. – С. 87–93. 3. Комп'ютерна система підвищення ефективності алмазного шліфування в умовах неповної інформації / О.Ф. Енікеєв // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. Міжнародний науково-технічний журнал ВНТУ. – Вінниця: № 2, 2014. – С. 40 – 49.

Bibliography (transliterated): 1. Enikeev A.F. Optimal'noe upravlenie tehnologicheskim processom almaznogo shlifovanija. – Kramatorsk: DGMA, 2001. – 160 p. 2. Sintez cifrovogo reguljatora poperechnoi peredachi shlifival'nogo kruga / Enikeev O.F., Zikov I.P. // Vestnik Nacional'nogo tehničeskogo universiteta «KhPI». – Kharkov. – No 57, 2008. – P. 87–93. 3. Komp'juterna sistema pidvishhennja efektyvnosti almaznogo shlifuvannja v umovah nepovnoi informacii / O.F. Enikeev // Informacijni tehnologii ta komp'juterna inzhenerija. Mizhnarodnij naukovo-tehnichnij zhurnal VNTU. – Vinnicja: No 2, 2014. – P. 40 – 49.

Подано до редколегії 25.10.2015

Енікеєв Олександр Фанилович – канд. техн. наук, доцент, Український державний університет залізничного транспорту (УкрДУЗТ), м. Харків, (050)-194-33-57, (096)-245-32-83, e-mail: Al_enikeev@bigmir.net;

Єнікеєв Олександр Фанілович – Candidate of Technical Sciences, Docent, Kharkov State Academy of Railway Transport, Kharkov, tel.: (050)-194-33-57, (096)-245-32-83, e-mail: Al_enikeev@bigmir.net;

Євсюкова Фатима Магомедієвна – старший викладач НТУ «ХПИ», (097)-941-22-99, e-mail: evsyukova_fatima@mail.ru;

Yevsyukova Fatyma Mahometdiievna – Senior Lecturer of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», (097)-941-22-99, e-mail: evsyukova_fatima@mail.ru;

Приходько Ольга Юрївна – канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПИ», тел.: (057)-720-66-25;

Prykhodko Olha Yurivna – Candidate of Technical Sciences, Docent, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25.

УДК 621.9.044

*Г.И. КОСТЮК, Т.А. ПОСТЕЛЬНИК, О.М. МЕЛКОЗЕРОВА***ОБЪЕМ НАНОКЛАСТЕРА И ГЛУБИНЫ ЕГО ЗАЛЕГАНИЯ ПРИ ДЕЙСТВИИ ИОНОВ РАЗНЫХ ЭНЕРГИЙ, СОРТОВ И ЗАРЯДОВ НА ТИТАНОВЫЙ СПЛАВ ВТ-1**

Проведены исследования величины объема нанокластера и глубины его залегания в зависимости от энергии, заряда и сорта ионов (B^+ , N^+ , C^+ , Al^+ , V^+ , Cr^+ , O^+ , Ni^+ , Zr^+ , Mo^+ , Hf^+ , W^+ , Ta^+ , Pt^+), что позволяет определить состав ионов, их энергии и заряды для получения наноструктур в требуемом слое, а с учетом необходимой плотности ионного тока оценить практически все технологические параметры для получения слоя требуемой толщины и физико-механических характеристик в титановом сплаве ВТ-1.

Ключевые слова: объем нанокластера, ионы, глубина залегания, плотность ионного тока, титановый сплав, наноструктуры.

Введение. Применение титановых сплавов для создания деталей авиационной и ракетной техники выдвигает ряд важных требований к их поверхностному слою: высокая износостойкость и контактная прочность (что связано с необходимостью получения высокой микротвердости), повышение ударной и усталостной прочности, а также коррозионной стойкостью (что связано с необходимостью получения высоких физико-механических характеристик поверхностного слоя). При реализации НС в достаточно большом слое при соответствующем выборе плотности ионного тока для каждого сорта иона можно прогнозировать глубину слоя и эксплуатационные характеристики детали. Всё это позволит получать детали авиационной техники из титановых сплавов с высокими прочностными характеристиками и достаточной работоспособностью.

Работа выполнялась в рамках программы Министерства образования и науки Украины «Новые и ресурсосберегающие технологии в энергетике, промышленности и агропромышленном комплексе» (подсекция 13 «Аэрокосмическая техника и транспорт») и по темам: «Создание физико-технических основ повышения качества материалов аэрокосмических конструкций» и «Разработка технологических основ интегрированных технологий плазменно-ионной обработки деталей аэрокосмической техники» (подсекция 6 «Физико-технические проблемы материаловедения»), «Концепция создания наноструктур, нано- и традиционных покрытий с учетом влияния адгезии на эффективность и работоспособность деталей АТ, АД и РИ», хозяйственных работ и договоров о сотрудничестве.

Анализ последних исследований и литературы. На основе многих исследований наноструктур [1–18] показана возможность конструирования поверхностного слоя детали за счет наноструктур, но научных основ такого конструирования еще не создано. Очевидно, что имея возможность создавать слои из наноструктур требуемых физико-механических характеристик и на необходимой глубине можно существенно продвинуть эти исследования и решить вопрос о наноструктурах в поверхностном слое, обеспечивающих существенное повышение работоспособности деталей. Ясно, что, зная размер зерна, который будет получаться в соответствующем слое, можно прогнозировать изменение физико-механических ха-

рактеристик поверхностного слоя по глубине, а следовательно, выбирать слои, которые обеспечат конструирование слоя по требуемым характеристикам. Всё это говорит о своевременности и актуальности проводимых исследований и дает пути создания сложных композитных наноструктурных слоев, имеющих высокую работоспособность и достаточно высокие физико-механические характеристики, причем по глубине они будут изменяться с учетом возможностей соответствующих слоев наноструктур.

Целью данной статьи является определение технологических режимов потоков ионов различных сортов, энергий и зарядов для получения наноструктур.

Постановка проблемы. Анализ исследований по получению наноструктур в конструкционных материалах, результаты которых приведены в обзорах работ [1–18], показал, что теоретических работ, за исключением [1–2], по получению наноструктур практически нет, а значит, и отсутствуют научные основы получения технологических параметров потоков ионов для прогноза и научного подхода к определению технологических параметров для получения слоев наноструктур требуемой толщины в целях повышения работоспособности деталей и режущего инструмента.

Материалы исследований. На основе моделирования [1] тепловых и термомеханических процессов в зоне действия ионов определили зону материала, где выполняются условия для образования наноструктур: температуры лежат в диапазоне 500–1500 К, скорости их нарастания больше 10^7 К/с и температурные напряжения в диапазоне 10^7 – 10^9 Па, что ускоряет процесс образования наноструктур. Из условия наиболее удачного заполнения наноструктурами объема плотность тока выбрана равной первой критической плотности тока [3].

Результаты исследований. В настоящей статье рассматриваются объем наноструктурированного кластера и глубина его залегания в магниевом сплаве, что позволит обеспечить высокий ресурс деталей из магниевых сплавов. Величина объема наноструктур при единичном действии иона на титановый сплав дает возможность прогнозировать требуемую плотность ионного тока в потоке для полного заполнения слоя, где возможно образование НС для этого иона соответствующего сорта, энергии и заряда. На рис. 1–9

представлены зависимости объема нанокластера и глубин его залегания от энергии E и зарядового числа z для ионов: В, С – рис. 1; N, Al – рис. 2; V, Cr – рис. 3, аналогичные зависимости для ионов O, Fe – рис. 4; Ni, Co – рис. 5; Y, Zr – рис. 6; Mo, Hf – рис. 7; Ta, W – рис. 8; Pt – рис. 9.

Очевидно, что с ростом энергии ионов и их зарядов реализуется существенный рост объемов НС, также влияет и заряд для ионов бора и углерода на объем $V_{\max} = 1,1 \cdot 10^{-22} \text{ м}^3$ (рис. 1, а) и на глубину залегания объемов НС (рис 1, б, в) $h_{\max} = 8,7 \cdot 10^{-8} \text{ м}$; $h_{\min} = 7,3 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ ($E = 2 \cdot 10^4 \text{ эВ}$).

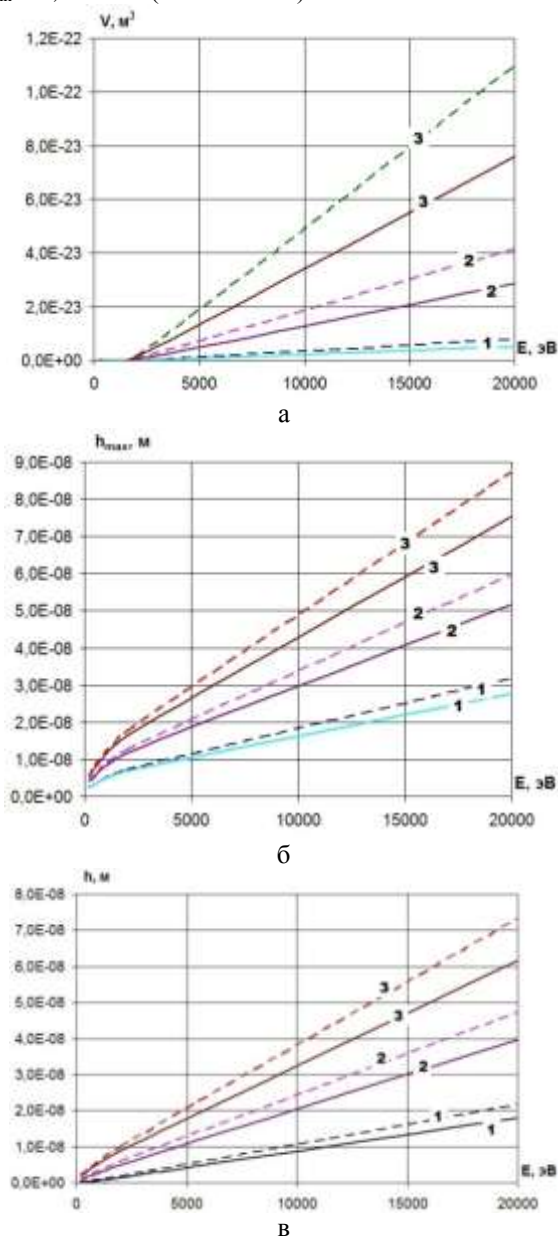


Рис. 1 – Объем нанокластера V , максимальная h_{\max} и минимальная h глубина его залегания в зависимости от энергии ионов бора (--) и углерода (–) на титановый сплав (1 – $Z = 1$, 2 – $Z = 2$, 3 – $Z = 3$): а – бъем нанокластера; б – максимальная глубина залегания нанокластера; в – минимальная глубина залегания нанокластера

Для случая действия ионов азота и алюминия на титановый сплав определяющее влияние оказывают энергия и заряд иона (рис. 2, а), причем глубина его

залегания растет существенно с ростом энергии и заряда ионов. Максимальная глубина, на которой существует нанокластер составляет $6,6 \cdot 10^{-8} \text{ м}$, тогда как минимальная – $5,3 \cdot 10^{-8}$, а максимальный объем НК – $5,5 \cdot 10^{-23} \text{ м}^3$ при $E = 2 \cdot 10^4 \text{ эВ}$.

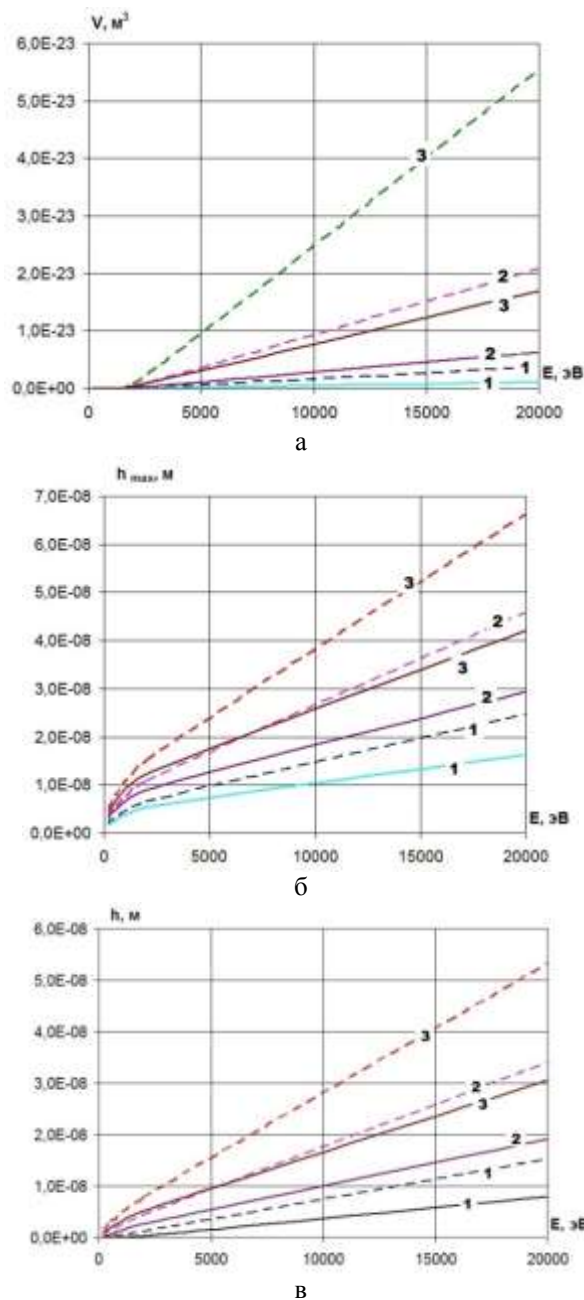


Рис. 2 – Объем нанокластера V , максимальная h_{\max} и минимальная h глубина его залегания в зависимости от энергии ионов азота (--) и алюминия (–) на титановый сплав (1 – $Z = 1$, 2 – $Z = 2$, 3 – $Z = 3$): а – бъем нанокластера; б – максимальная глубина залегания нанокластера; в – минимальная глубина залегания нанокластера

Аналогичные зависимости для случая действия ионов ванадия и хрома представлены на рис. 3. Очевидно, что энергия, а также и заряд иона влияют существенно (рис. 3, а), тогда как переход от ванадия к хрому практически не изменил характера и численного значения величин.

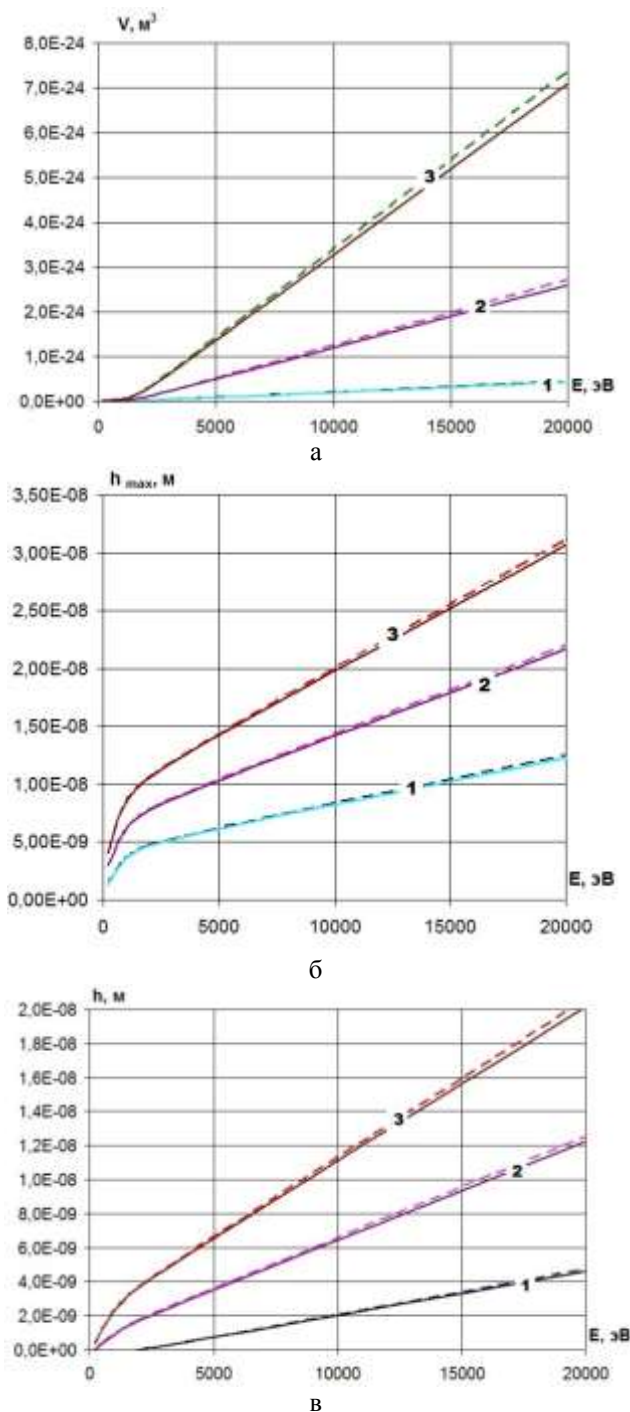


Рис. 3 – Объем нанокластера V , максимальная h_{\max} и минимальная h глубина его залегания в зависимости от энергии иона ванадия (--) и хрома (–) на титановый сплав (1 – $Z = 1$, 2 – $Z = 2$, 3 – $Z = 3$): а – бъем нанокластера; б – максимальная глубина залегания нанокластера; в – минимальная глубина залегания нанокластера

То же самое наблюдается и для глубин залегания НК, причем на глубину залегания существенно влияют энергия и заряд ионов. В случае действия ионов кислорода и железа объем нанокластера также существенно зависит от энергии и заряда (рис. 4, а), и глубины залегания нанокластера (максимальная и минимальная), (рис. 4, б, в). Максимальный объем НК – $4,27 \cdot 10^{-23} \text{ м}^3$, а максимальная и минимальная глубина

залегания – соответственно $6 \cdot 10^{-8}$ и $4,71 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ ($E = 2 \cdot 10^4 \text{ эВ}$).

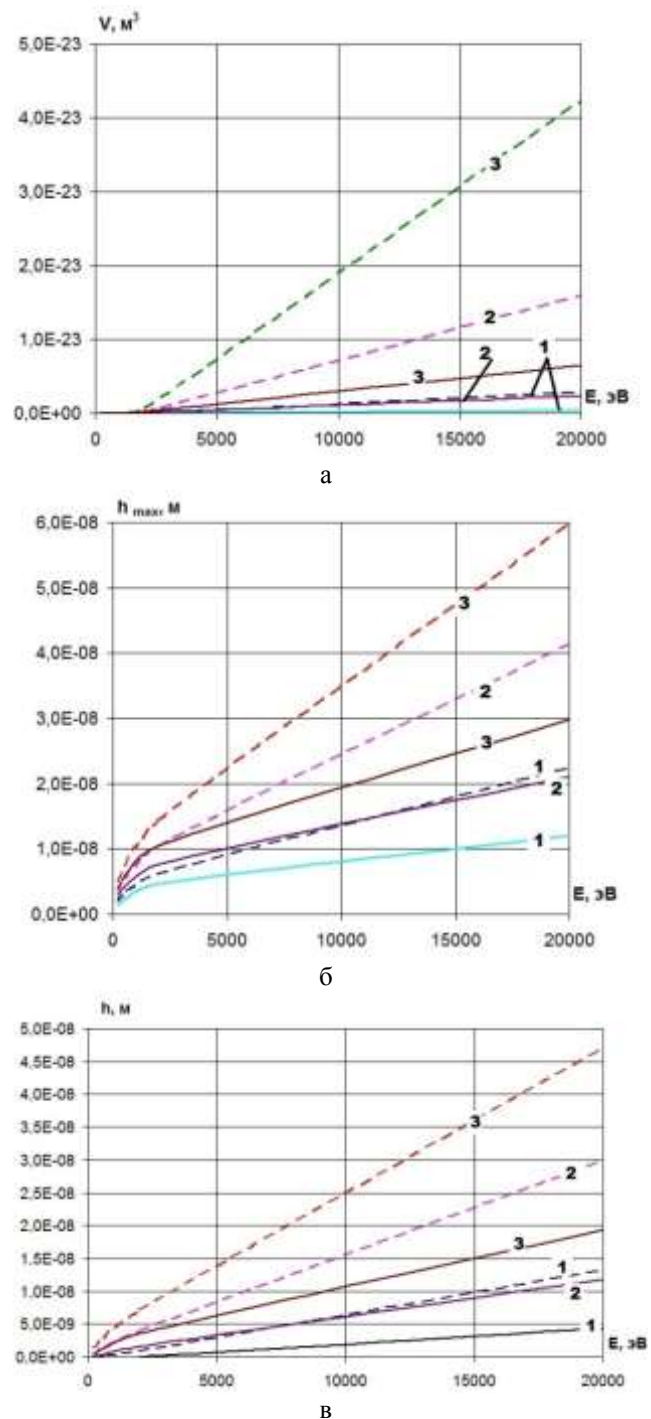


Рис. 4 – Объем нанокластера V , максимальная h_{\max} и минимальная h глубина его залегания в зависимости от энергии иона кислорода (--) и железа (–) на титановый сплав (1 – $Z = 1$, 2 – $Z = 2$, 3 – $Z = 3$): а – бъем нанокластера; б – максимальная глубина залегания нанокластера; в – минимальная глубина залегания нанокластера

Действие ионов никеля и кобальта позволяет получать нанокластеры довольно значительных размеров, причем их величина существенно зависит от энергии и заряда ионов. Такое же влияние испытывает и максимальная и минимальная глубина залегания НК (рис. 5, б, в), но переход от никеля к кобальту практически

не меняет ни объема нанокластера, ни глубины его залегания. Максимальный объем НК – $6,32 \cdot 10^{-24} \text{ м}^3$, а $h_{\text{max}} = 2,95 \cdot 10^{-8}$, $h_{\text{min}} = 1,91 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ ($E = 2 \cdot 10^4 \text{ эВ}$; $Z = 3$).

также наблюдается определяющая зависимость объема (рис. 6, а) и глубин его залегания (рис. 6, б, в) от энергии и заряда иона, тогда как переход от иона иттрия к иону циркония эти зависимости не изменяет.

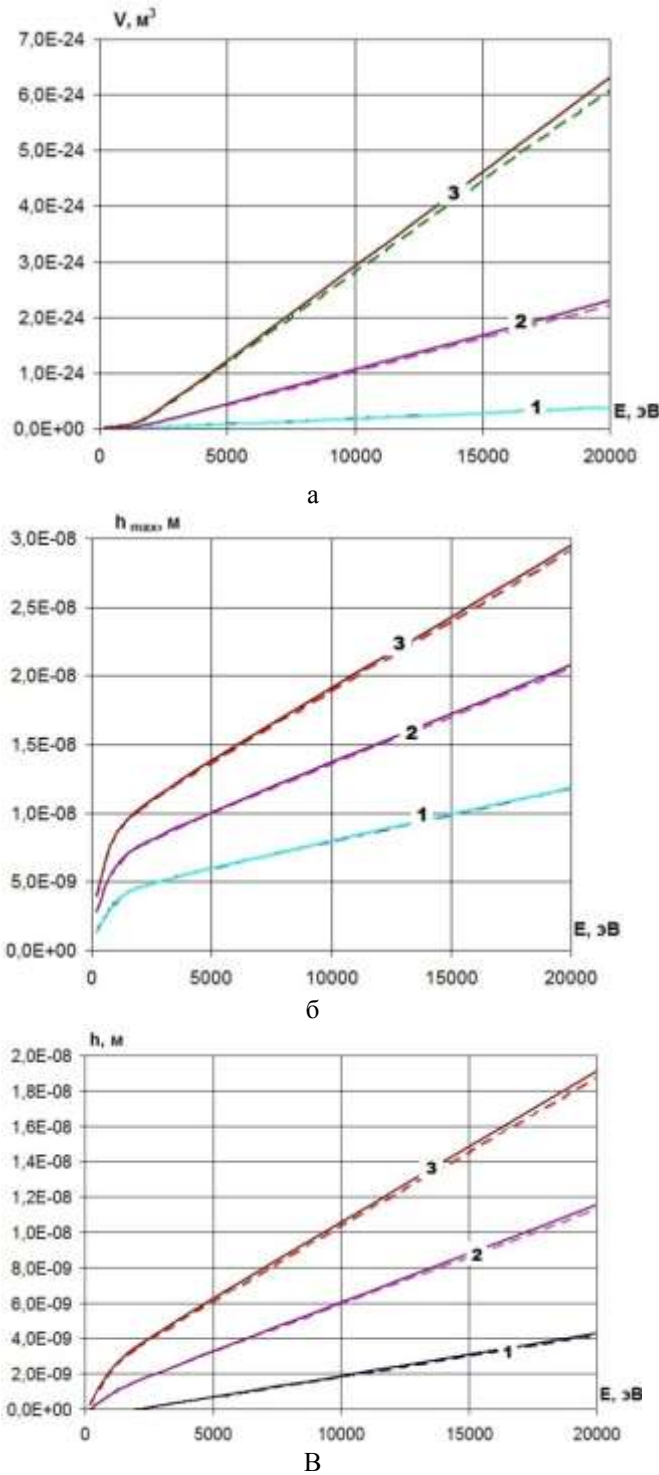


Рис. 5 – Объем нанокластера V , максимальная h_{max} и минимальная h глубина его залегания в зависимости от энергии ионов никеля (--) и кобальта (–) на титановый сплав (1 – $Z = 1$, 2 – $Z = 2$, 3 – $Z = 3$): а – бъем нанокластера; б – максимальная глубина залегания нанокластера; в – минимальная глубина залегания нанокластера

Аналогичные зависимости для случая действия ионов иттрия и циркония представлены на рис. 6,

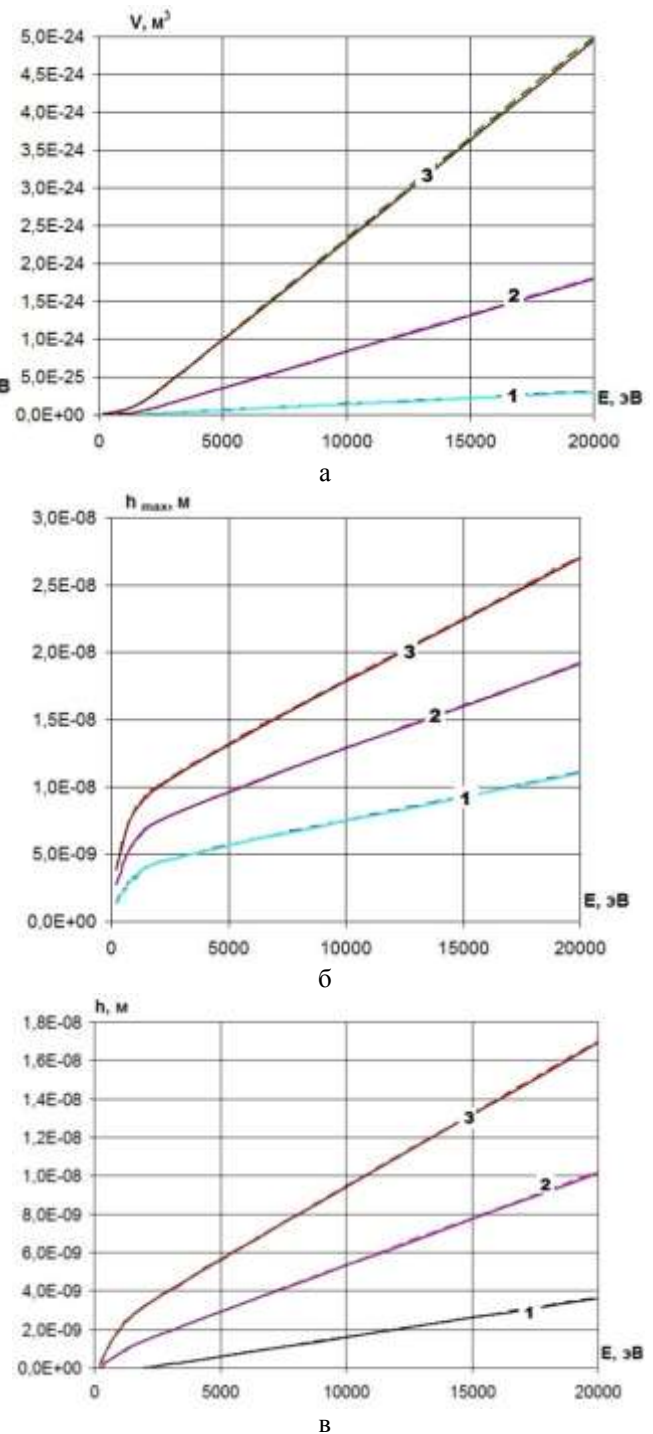
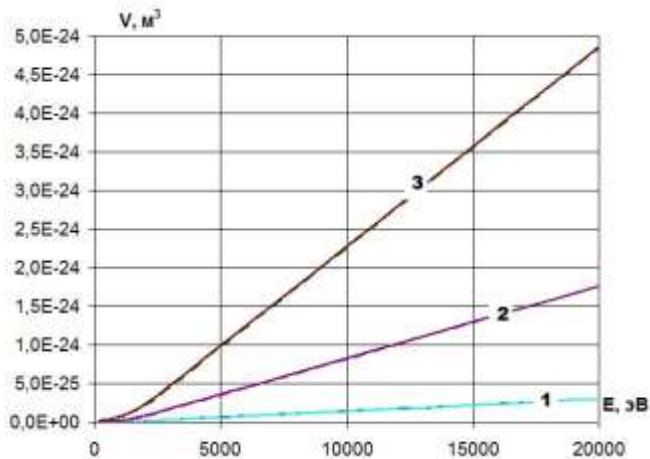


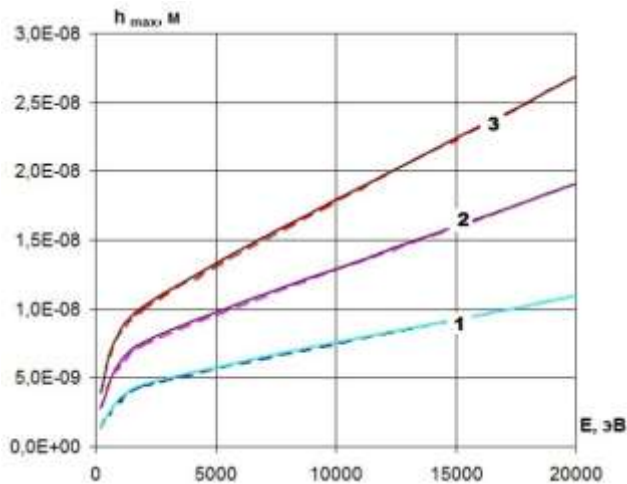
Рис. 6 – Объем нанокластера V , максимальная h_{max} и минимальная h глубина его залегания в зависимости от энергии ионов иттрия (--) и циркония (–) на титановый сплав (1 – $Z = 1$, 2 – $Z = 2$, 3 – $Z = 3$): а – бъем нанокластера; б – максимальная глубина залегания нанокластера; в – минимальная глубина залегания нанокластера

При действии ионов молибдена и гафния на магниевый сплав объем (рис. 7, а) и глубина залегания (рис.

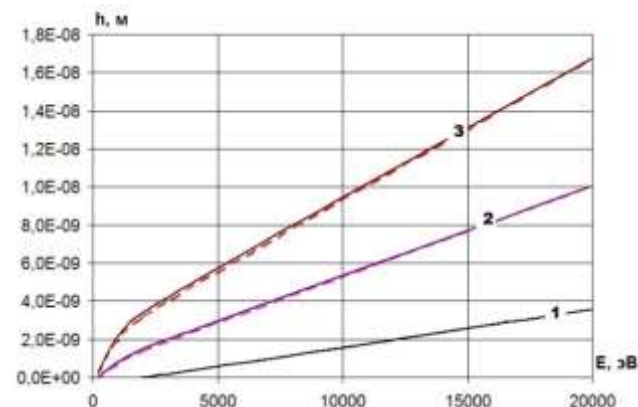
7, б, в) нанокластера существенно зависят от энергии и заряда иона. Для этих ионов величины объемов и глубин залегания практически одинаковы.



а



б

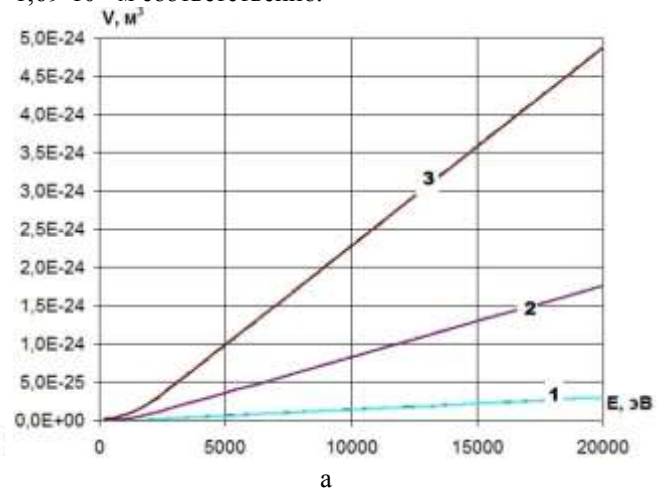


в

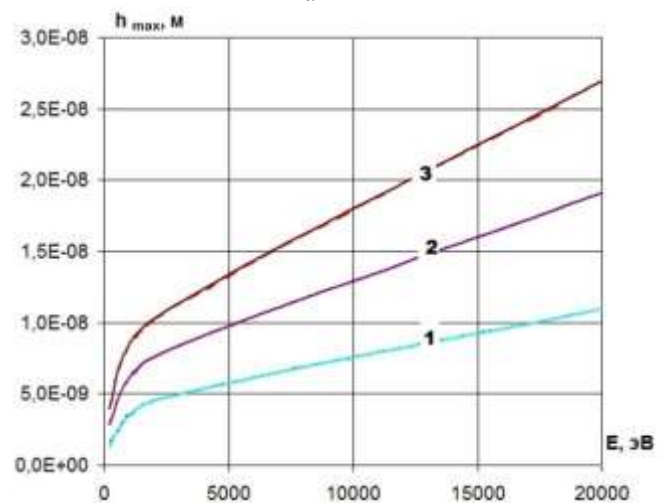
Рис. 7 – Объем нанокластера V , максимальная h_{\max} и минимальная h глубина его залегания в зависимости от энергии ионов молибдена (--) и гафния (–) на титановый сплав (1 – $Z = 1$, 2 – $Z = 2$, 3 – $Z = 3$): а – бъем нанокластера; б – максимальная глубина залегания нанокластера; в – минимальная глубина залегания нанокластера

Для случая действия тантала и вольфрама влияние сорта иона практически отсутствует, а замечено определяющее влияние энергии и заряда иона (рис. 8).

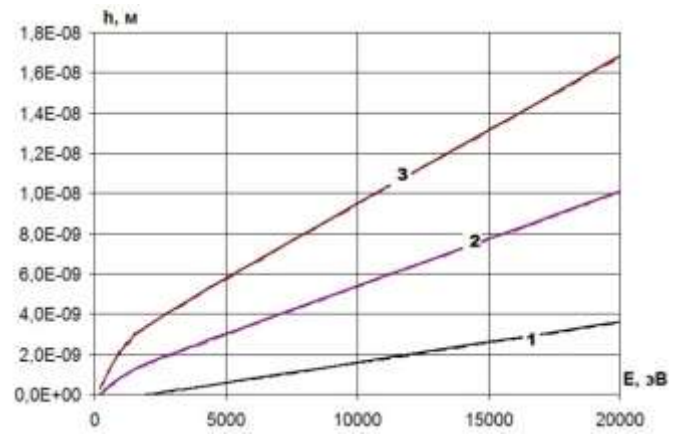
Максимальный объем НК – $4,38 \cdot 10^{-24} \text{ м}^3$, а максимальная и минимальная глубина его залегания – $2,69 \cdot 10^{-8}$ и $1,69 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ соответственно.



а



б



в

Рис. 8 – Объем нанокластера V , максимальная h_{\max} и минимальная h глубина его залегания в зависимости от энергии ионов тантала (--) и вольфрама (–) на титановый сплав (1 – $Z = 1$, 2 – $Z = 2$, 3 – $Z = 3$): а – бъем нанокластера; б – максимальная глубина залегания нанокластера; в – минимальная глубина залегания нанокластера

При действии платины на титановый сплав также отмечается высокое влияние энергии и заряда иона на величины объема и глубины его залегания (рис. 9).

В этом случае объем НК – $4,97 \cdot 10^{-24} \text{ м}^3$ и глубина залегания составляет $h_{\max} = 2,71 \cdot 10^{-8} \text{ м}$, $h_{\min} = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ м}$.

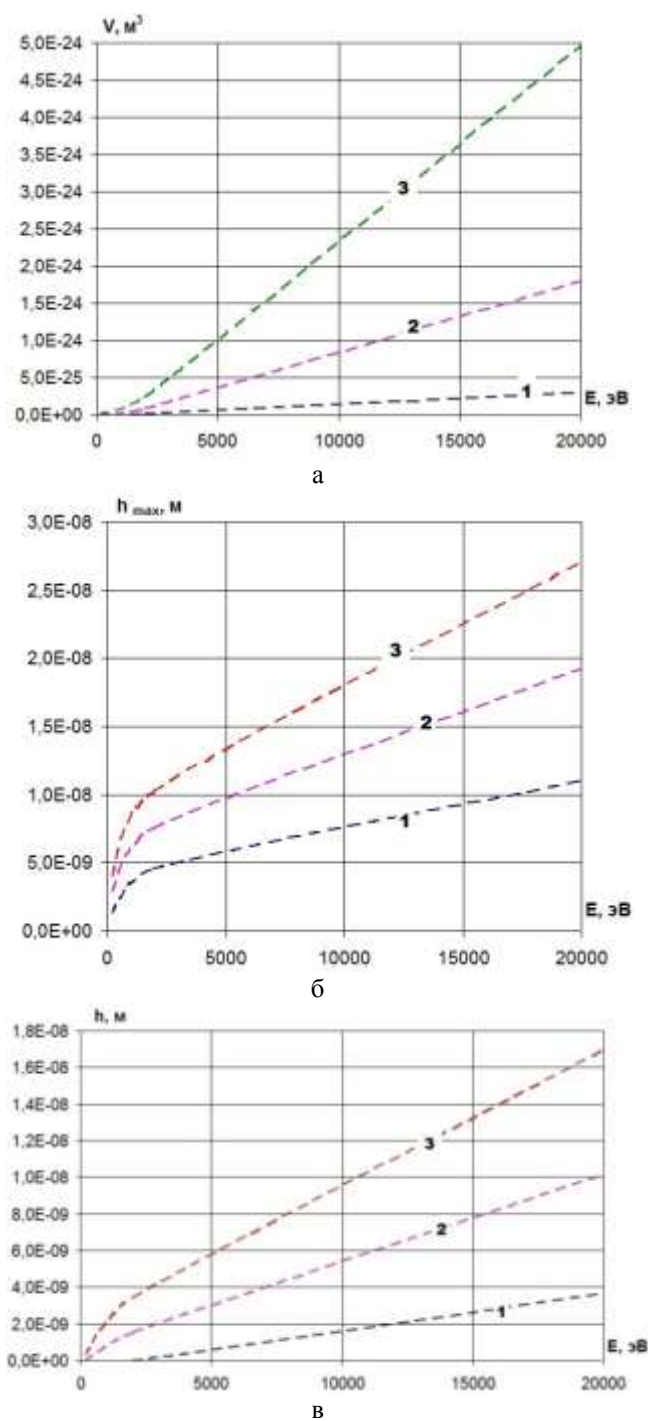


Рис. 9 – Объем нанокластера V , максимальная h_{\max} и минимальная h глубина его залегания в зависимости от энергии ионов платины (–) на титановый сплав (1 – $Z = 1$, 2 – $Z = 2$, 3 – $Z = 3$): а – бъем нанокластера; б – максимальная глубина залегания нанокластера; в – минимальная глубина залегания нанокластера

Полученные зависимости будут необходимы для определения потребной плотности тока соответствующего сорта, заряда и энергии для полного заполнения слоя наноструктурами, а выбрав необходимые

энергии, заряды и сорта ионов для получения наноструктур в основном требуемой толщины, аналогично проводим оценки требуемых плотностей токов в каждом слое.

Зная объем, занимаемый наноструктурой при соответствующих энергиях, сортах и зарядах ионов и диапазон глубин, на которых этот объем находится, очевидно можно оценить плотность ионного тока.

Тогда по известным диапазонам глубин залегания зон, где образуются наноструктуры, выбираем энергии, сорта и зарядности ионов для полного заполнения объема по глубине, т.е. так, чтобы они дополняли друг друга. Далее определяем плотность тока каждого из сортов иона и заряда, чтобы максимально заполнить необходимый объем поверхностного слоя детали наноструктурами (желательно, чтобы окончание первого слоя было началом второго, окончание второго – началом третьего слоя, и так далее). Тогда для любого i -го слоя плотность тока определяется как

$$j_i = \frac{h_{i2} - h_{i1}}{V_{NCi}} z_i e,$$

где h_{i1} и h_{i2} – начальная и конечная координаты зоны, где реализуются наноструктуры для i -го иона; V_{NCi} – объем зоны, где образуются наноструктуры; z_i – зарядовое число i -го иона; e – заряд электрона.

Зная j_i , V_{NCi} , h_{i1} , h_{i2} и z_i и выбрав E_i , мы можем сформировать необходимое количество потоков ионов, позволяющих получить наноструктурированный слой требуемой толщины, а с учетом технической задачи формирования немонотонных разнозарядовых потоков ионов можно решить задачу по технологическим параметрам ионной обработки.

Выводы.

1. Показана принципиальная возможность конструирования поверхностного слоя в титановом сплаве за счет создания наноструктур различного состава и физико-механических характеристик
2. Очевидно, что определяющее влияние на объем нанокластера оказывают энергия иона и его заряд, в то же время влияет и масса иона, правда, не так существенно.
3. Глубина залегания нанокластера достигает десятых долей микрометра, то есть слой материала, испытывающего существенные изменения, довольно значительный, а если учесть и возможность диффузии ионов и даже аномальной диффузии, то можно получить слои с измененными характеристиками уже в пределах нескольких микрометров.
4. Очевидно, что для ряда пар ионов (при действии их на магниевый сплав) зависимости объема нанокластера и глубины его залегания от энергии и заряда одинаковы. Такими парами являются: «ванадий-хром», «никель-кобальт», «иттрий - цирконий», «тантал-вольфрам» и «молибден-гафний».

Список литературы: 1. Костюк, Г.И. Нанотехнологии: выбор технологических параметров и установок, производительность обработки, физико-механические характеристики наноструктур [Текст]: моногр. / Г.И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2014. – 472 с. 2. Костюк, Г.И. Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы

[Текст]: моногр. / Г.И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 648 с. **3.** Костюк, Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст] / Г.И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. – Кн.1: Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, светолучевых и комбинированных технологий. – 596 с. **4.** Костюк, Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст] / Г.И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. – Кн. 2: Справочник для расчета основных физических и технологических параметров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования. – 482 с. **5.** Костюк, Г.И. Наноструктуры и нанопокрyтия: перспективы и реальность [Текст]: учеб. пособие / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с. **6.** Костюк, Г.И. Научные основы создания современных технологий [Текст]: учеб. пособие / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2008. – 552 с. **7.** Костюк, Г.И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем [Текст]: моногр.-справ. / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 633 с. **8.** Костюк, Г.И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем [Текст]: справ. / Г.И. Костюк. – К.: Вид-во АИНУ, 2003. – 412 с. **9.** Костюк, Г.И. Физико-технические основы роботизированного производства [Текст]: учеб. пособие / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. – 614 с. **10.** Гречихин, Л.И. Физика наночастиц и нанотехнологий [Текст] / Л.И. Гречихин. – М.: УП «Технопринт», 2004. – 397 с. **11.** Аксенов, И.И. Вакуумная дуга в эрозийных источниках плазмы [Текст] / И.И. Аксенов. – Х.: Изд-во НИИ «ХФТИ», 2005. – 211 с. **12.** Хаякава, С. Ядерно-физический аспект: в 2 кн. [Текст] / С. Хаякава. – М.: Мир, 1973. – Кн. 2. – 701 с. **13.** Готт, Ю.В. Взаимодействие частиц с веществом в плазменных исследованиях [Текст] / Ю.В. Готт. – М.: Атомиздат, 1978. – 271 с. **14.** Гусев, А.И. Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства [Текст] / А.И. Гусев. – Екатеринбург: Изд-во РАН, Уральское отд-ние, 1998. – 302 с. **15.** Гусев, А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии [Текст] / А.И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с. **16.** Решетняк, Е.Н. Синтез упрочняющих наноструктурных покрытий [Текст] / Е.Н. Решетняк, А.И. Стрельникий // Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – № 2. – С. 119 – 130. **17.** Андриевский, Р.А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы [Текст] / Р.А. Андриевский // Физика металлов и металловедение. – 2003. – Т. 91, № 1. – С.50 – 56. **18.** Состав, структура и свойства наноструктурных пленок боридов тантала [Текст] / А.А. Гончаров, П.И. Игнатенко, В.В. Петухов и др. // ЖТФ. – 2006. – Т. 76, №. 10. – С. 82 – 87.

Bibliography (transliterated): **1.** Kostyuk, G.I. Nanotekhnologii: vybor tekhnologicheskikh parametrov i ustanovok, proizvoditel'nost' obrabotki, fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki nanostruktur [Текст]: monogr. / G.I. Kostyuk. - Kiev: Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovatP. tekhnologiy, 2014. - 472 P. **2.** Kostyuk, G.I. Nanotekhnologii: teoriya,

eksperiment, tekhnika, perspektivy [Текст]: monogr. / G.I. Kostyuk. - Kiev: Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovatP. tekhnologiy, 2012. - 648 P. **3.** Kostyuk, G.I. Fiziko-tekhnicheskiye osnovy naneseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy [Текст] / G.I. Kostyuk. - Kiev: Izd-vo AINU, 2002. Kn.1: Fizicheskiye protsessy plazmenno-ionnykh, ionno-luchevykh, plazmennykh, svetoluchevykh i kombinirovannykh tekhnologiy. - 596 P. **4.** Kostyuk, G.I. Fiziko-tekhnicheskiye osnovy naneseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy [Текст] / G.I. Kostyuk. - Kiev: Izd-vo AINU, 2002. - Kn. 2: Spravochnik dlya rascheta osnovnykh fizicheskikh i tekhnologicheskikh parametrov, otsenki vozmozhnostey, vybora tipa tekhnologiy i oborudovaniya. - 482 P. **5.** Kostyuk, G.I. Nanostrukturny i nanopokrytiya: perspektivy i real'nost' [Текст]: ucheb.posobiye / G.I. Kostyuk. - Kharkov.: NatP. aerokosm. un-t «Khark. aviatP. in-t », 2009. - 406 P. **6.** Kostyuk, G.I. Nauchnyye osnovy sozdaniya sovremennykh tekhnologiy [Текст]: ucheb.posobiye / G.I. Kostyuk. - Kharkov.: NatP. aerokosm. un-t «Khark. aviatP. in-t », 2008. - 552 P. **7.** Kostyuk, G.I. Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem [Текст]: monogr.-sprav. / G.I. Kostyuk. - Kharkov: NatP. aerokosm. un-t «Khark. aviatP. in-t », 2007. - 633 P. **8.** Kostyuk, G.I. Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem [Текст]: sprav. / G.I. Kostyuk. - Kiev: Vid-vo AINU, 2003. - 412 P. **9.** Kostyuk, G.I. Fiziko-tekhnicheskiye osnovy robotizirovannogo proizvodstva [Текст]: ucheb.posobiye / G.I. Kostyuk. - Kharkov: NatP. aerokosm. un-t «Khark. aviatP. in-t », 2006. - 614 P. **10.** Grechikhin, L.I. Fizika nanochastits i nanotehnologii [Текст] / L.I. Grechikhin. - Moscow: UP «Tekhnoprint», 2004. - 397 P. **11.** Aksenov, I.I. Vakuumnaya duga v erozionnykh istochnikakh plazmy [Текст] / I.I. Aksenov. - Kharkov: Izd-vo NII «KHFTI», 2005. - 211 P. **12.** Khayakava, P. Yaderno-fizicheskiy aspekt: v 2 kn. [Текст] / P. Khayakava. - Moscow: Mir, 1973. - Kn. 2. - 701 P. **13.** Gott, YU.V. Vzaimodeystviye chastits s veshchestvom v plazmennykh issledovaniyakh [Текст] / YU.V. Gott. - Moscow: Atomizdat, 1978. - 271 P. **14.** Gusev, A.I. Nanokristallicheskiye materialy: metody polucheniya i svoystva [Текст] / A.I. Gusev. - Yekaterinburg: Izd-vo RAN, Ural'skoye otd-niye, 1998. - 302 P. **15.** Gusev, A.I. Nanomaterialy, nanostrukturny, nanotekhnologii [Текст] / A.I. Gusev. - Moscow: Fizmatlit, 2005. - 416 P. **16.** Reshetnyak, Ye.N. Sintez uprochnyayushchikh nanostrukturnykh pokrytiy [Текст] / Ye.N. Reshetnyak, A.I. Strel'nitskiy // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. - 2008. - No 2. - PP. 119 - 130. **17.** Andriyevskiy, R.A. Nanomaterialy: kontseptsiya i sovremennyye problemy [Текст] / R.A. Andriyevskiy // Fizika metallov i metallovedeniye. - 2003. - Vol. 91, No 1. - PP.50 - 56. **18.** Sostav, struktura i svoystva nanostrukturnykh plenok boridov tantala [Текст] / A.A. Goncharov, P.I. Ignatenko, V.V. Petukhov i dr. // ZHTF. - 2006. - Vol. 76, No. 10. - PP. 82 - 87.

Поступила (received) 09.09.2015

Костюк Геннадий Игоревич – док. техн. наук, проф. НАУ «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Kostyuk Gennadiy Igorevich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Aerospace University «KhAI», tel.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Постельник Татьяна Александровна – аспирант НАУ «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06; e-mail: tanya_postelnik@mail.ru;

Postelnyk Tatiana Aleksandrovna – graduate student, National Aerospace University «KhAI», tel.: (057)-788-42-06, e-mail: tanya_postelnik@mail.ru;

Мелкозерова Ольга Михайловна – канд. техн. наук, ассист. НАУ «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: Olja.mex@gmail.com;

Melkozerova Olha Mykhailovna – Candidate of Technical Sciences, assistant, National Aerospace University «KhAI», tel.: (057)-788-42-06, e-mail: Olja.mex@gmail.com.

УДК 621.039.56

С.С. ДОБРОТВОРСКИЙ, С.С. ГНУЧИХ, Л.Г. ДОБРОВОЛЬСКАЯ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УДАРНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПЛАСТИН ПОЛУСФЕРИЧЕСКИМ УДАРНИКОМ

Проведено компьютерное моделирование процесса ударного деформирования пластин, состоящих из материалов различной толщины, полусферическим ударником. В связи с повышением скоростей обработки деталей машин, защитные конструкции в станкостроении нуждаются в повышении ударной стойкости, при одновременном снижении материалоемкости. Рассматривалась задача контактного динамического деформирования пластины при больших скоростях протекания процесса. Для высокоскоростного процесса деформирования учитывалась зависимость физико-механических свойств материала от уровня скоростей деформации. Компьютерное моделирование процесса проводилось специализированным программным комплексом ANSYS в модуле "Explicit Dynamics" основанным на применении метода конечных элементов в условиях высоких скоростей. Анализ полученных данных показал преимущества применения многослойных пластин с керамическим слоем.

Ключевые слова: математическое моделирование, метод конечных элементов, многослойные пластины.

Введение. В современном машиностроении при повышении скоростей обработки, возникает необходимость повышения прочности и ударной стойкости средств защиты, при одновременном снижении материалоемкости. Внимание исследователей привлекает проблема, моделирование процесса взаимодействия деформируемых, многослойных пластин конечной толщины с деформируемым ударником. Такие пластины могут применяться в деталях машин, средствах защиты. Комбинации таких пластин из различных по свойствам материалов мало изучены и могут дать неожиданные результаты. Исследование сочетаний этих материалов на опытных образцах дорогое и непродуктивное занятие, поэтому в противовес ему предлагается использование современных инженерных программ.

Анализ последних исследований и литературы. Из обзора работ зарубежных и отечественных авторов установлено [1], что мировые тенденции повышения производительности и качества инженерных работ состоят в уходе от опытного, ручного труда к программному моделированию систем и процессов протекающих в них.

Разработка имитационного подхода к моделированию процесса ударного деформирования пластин дает возможность оптимизировать и улучшить характеристики проектируемой детали. Несмотря на большое внимание к данной проблеме и имеющиеся в литературе работы в этой области как экспериментального, так и теоретического плана, проблема далека от полного решения.

Целью данной статьи является изучение методов и результатов математического моделирования процесса ударного деформирования пластин конечной толщины полусферическим ударником, исследование закономерностей разрушения комбинированных слоистых преград при высокоскоростном ударе деформируемыми ударниками. Нахождение оптимального сочетания материала и толщины этих пластин.

Постановка проблемы. В настоящей работе мы рассматривали задачи моделирования процессов высокоскоростного деформирования тонкостенной изотропной пластины и пакетов пластин, которые имеют

однородную структуру, под действием ударного нагружения ударником с полусферической формой рабочей части. Для определения деформированного состояния таких пластин решается динамическая вязкопластическая контактная задача с граничными и начальными условиями. При таком воздействии мы учитывали изменение прочностных характеристик материала, наличие больших пластических деформаций, нагрев. При исследовании учитывали конструктивные особенности пластины, форму, геометрию, величину, скорости и материал ударника. Для этого было использовано компьютерное проектирование и моделирование образов исследуемых объектов на базе вычислительных логических алгоритмов CAE-модуля ANSYS.

Материалы исследований. Движение сплошной среды описываем используя: закон сохранения массы, закон сохранения импульса, закон сохранения энергии, модель материала, начальных условий, граничных условий.

Математическая модель движения сплошной среды, описываемая с использованием перечисленных выше уравнений, численно решается в ANSYS, путем использования явного интегрирования по времени а также различных методик решения.

Для Лагранжевых формулировок плотность в любой момент может быть определена из текущего объема зоны и ее первоначальной массы.

Частные дифференциальные уравнения, которые выражают закон сохранения импульса связывают ускорение и тензор напряжений σ_{ij} [3]:

$$\begin{aligned} p\ddot{x} &= b_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z}; \\ p\ddot{y} &= b_y + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z}; \\ p\ddot{z} &= b_z + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}. \end{aligned} \quad (1)$$

Сохранение энергии выражается через:

$$\dot{e} = \frac{1}{\rho} (\sigma_{xx}\dot{\epsilon}_{xx} + \sigma_{yy}\dot{\epsilon}_{yy} + \sigma_{zz}\dot{\epsilon}_{zz} + 2\sigma_{xy}\dot{\epsilon}_{xy} + 2\sigma_{yz}\dot{\epsilon}_{yz} + 2\sigma_{zx}\dot{\epsilon}_{zx}). \quad (2)$$

Эти уравнения решались в явном виде для каждого элемента модели, основанной на входных значениях в конце предыдущего шага по времени. Для обеспечения стабильности и точности решения использовалось малое время приращения. В корректном моделировании, масса, импульс и энергия сохранялись.

При интегрировании применяли метод центральных разностей. Ускорения оцениваются для t :

$$\{a_t\} = [M]^{-1}([\{F_t^{ext}\}] - [\{F_t^{int}\}]), \quad (3)$$

где $\{a_t\}$ – вектор ускорения;
 $[M]$ – матрица масс,
 $\{F_t^{ext}\}$ вектор приложенных внешних сил,
 $\{F_t^{int}\}$ вектор внутренних сил:

$$F^{int} = \sum \left(\int_{\Omega} B^T \sigma_n d\Omega + F^{hg} \right) + F^{contact}, \quad (4)$$

где F^{hg} – сила hourglass-сопротивления, $F^{contact}$ – сила контакта.

Затем вычислялись скорости и перемещения:

$$\begin{aligned} \{v_{t+\Delta t/2}\} &= \{v_{t-\Delta t/2}\} + \{a_t\} \Delta t; \\ \{u_{t+\Delta t}\} &= \{u_t\} + \{v_{t+\Delta t/2}\} \Delta t; \\ \Delta t_{t+\Delta t/2} &= 0.5(\Delta t_t + \Delta t_{t+\Delta t}); \\ \Delta t_{t-\Delta t/2} &= 0.5(\Delta t_t - \Delta t_{t+\Delta t}). \end{aligned} \quad (5)$$

Геометрия обновлялась добавлением приращений перемещений к исходной геометрии $\{x_0\}$:

$$\{x_{t+\Delta t}\} = \{x_0\} + \{u_{t+\Delta t}\}. \quad (6)$$

Для упрощения обращения матриц используем диагональную матрицу масс. Уравнения становятся несвязанными и могут решаться напрямую (явно).

Для исследования деформирования хрупких материалов мы использовали модель Johnson-Holmquist [2]. В этой модели предел прочности хрупкого материала в процессе его разрушения меняется от предела прочности исходного неповрежденного материала σ_0 до предела прочности полностью разрушенного (измельченного) материала σ_p . Соответствующее уравнение имеет вид:

$$\sigma = \sigma_0 - D(\sigma_0 - \sigma_p), \quad (7)$$

где D – поврежденность ($0 \leq D \leq 1$).

Пределы прочности неповрежденного и полностью разрушенного материалов зависят от текущих давления и скорости деформации:

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= A(P + T_p)^N \left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right); \\ \sigma_p &= B P^M \left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right), \end{aligned} \quad (8)$$

где A, N, C, B, M – постоянные, $\dot{\epsilon}_0 = 1,0 \text{ с}^{-1}$.

Численные значения, постоянных коэффициентов данной модели, для корундовой, карбидокремневой керамики и натрийсиликатного стекла [8] приведены в таблице 1.

Эффективный предел прочности разрушенной керамики $\sigma_{кр}$ может быть описан эмпирическим соотношением [3]:

$$\sigma_{кр} = 0,2 \sigma_{зд} \left\{ 1 - \exp \left[\frac{-\lambda \sigma_{зд}}{0,2 \sigma_{зд}} \left(\frac{\delta_n}{h} \right)^2 \right] \right\}, \quad (9)$$

где $\sigma_{зд}$ и $\sigma_{з}$ – пределы прочности неповрежденной керамики и материала подложки соответственно;
 δ_n – толщина подложки;
 $\lambda \approx 1$ – подгоночный коэффициент;
 h – текущая толщина керамического слоя между проникающим ударником и границей раздела с подложкой.

Таблица 1 – Численные значения постоянных модели Джонсона-Холмквиста.

Постоянные	Al ₂ O ₃	SiC	B ₄ C
ρ_0	3,91г/см ³	3,16г/см ³	2,51г/см ³
Модуль Юнга, ГПа	379	423	233
Модуль сдвига, ГПа	153	183	197
γ , ГПа	3,76	5,9	2,33
T_p , ГПа	0,16	0,16	0,16
A	0,98	0,96	0,987
B	0,35	0,35	0,5
C	0	0	0,027
M	1	1	1
N	0,39	0,65	0,77
D ₁	0,007	0,0048	0,1
D ₂	1,24	0,48	1
g	1,4	0,48	0,15
$e_{пл}^p$ (p=0), %	0,1	0,1	0,1

Результаты исследования. Расчетная схема процесса ударного деформирования пластин полусферическим ударником, созданная в CAD – системе. На рис. 1 представлена конечно-элементная трехмерная модель.

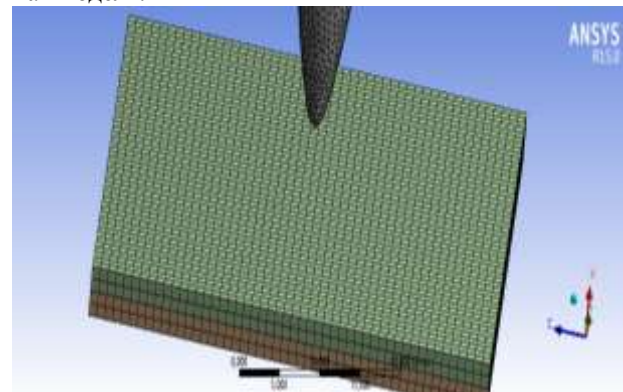


Рис. 1 – Расчётная схема

В каждом конкретном случае назначалась адекватная расчетная сетка, обеспечивающая сходимость решения. Конечно-элементная модель состоит из 2000-50000 параллелепипедов и гексаэдральных элементов. Модель материалов вносилась в базу данных ANSYS представляя собой таблично заданные параметры характеризующие данный материал (таб. 2). Для хрупких материалов задавались коэффициенты Johnson-Holmquista [2] приведенный в таблица 1.

Таблица 2 – Исходные данные материала

	Aluminum	Titanium	BK8	Steel
Плотность (кг/м ³)	2770	4620	14870	7850
Модуль Юнга (Па)	7,1 E+10	9,6E+10	5E+11	2E+11
Коэффициент Пуассона	0,33	0,36	0.2	0,3
Модуль объемной упругости (Па)	6,96 E+11	1,14E+11	3,32E+11	1,66E+11
Модуль сдвига (Па)	2,66 E+10	3,5E+10	2,49E+11	7,69E+10

Поиск области существования оптимальных деформации многослойных пластин осуществляли с помощью многочисленных экспериментов с изменением толщины пластин (мм), сравнивая их с поведением одинарных пластин. На рисунках 2, 3 представлены полученные зависимости величины запреградного прогиба от толщины пластины титана и алюминия. Пробитие титановой пластины происходит при толщине 2,5 мм и меньше. Тылный прогиб пластин в промежутке её толщины от 3 до 5 мм считаем опти-

мальным. Пробитие алюминиевой пластины происходит при толщине 7 мм и меньше. Тылный прогиб пластин в промежутке её толщины от 8 до 10 мм считаем оптимальным.

На рисунке 3 представлены зависимости полученные при моделировании деформации многослойных пакетов при разных толщинах. Результаты моделирования показывают что ударная прочность изделий из чистого листового материала меньше чем многослойных пакетов с аналогичными параметра.

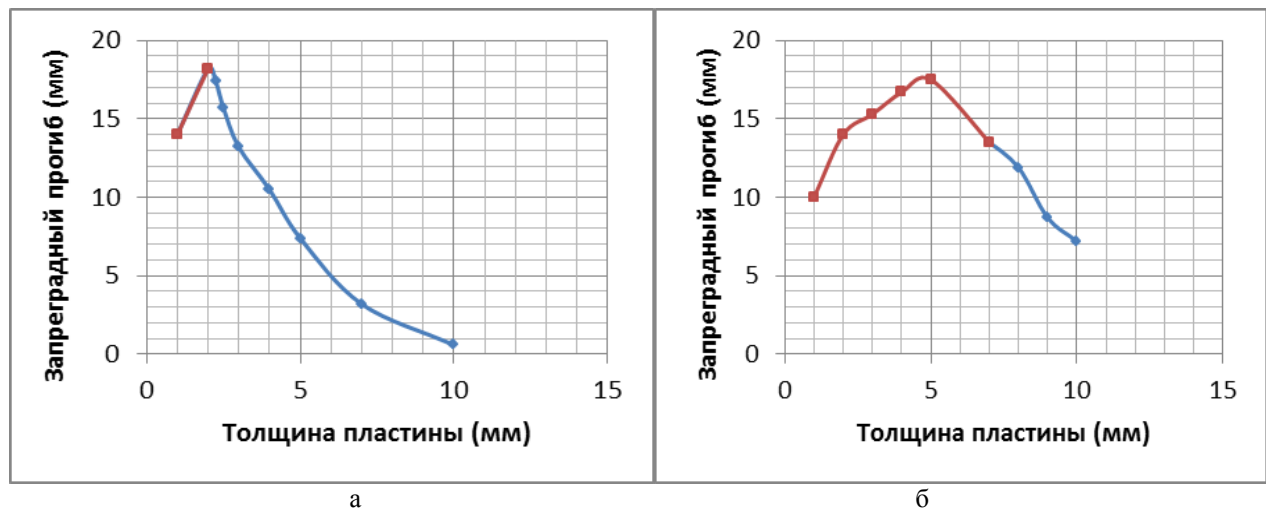


Рис. 2 – Зависимость величины прогиба от толщины пластины: а – титана; б – алюминия

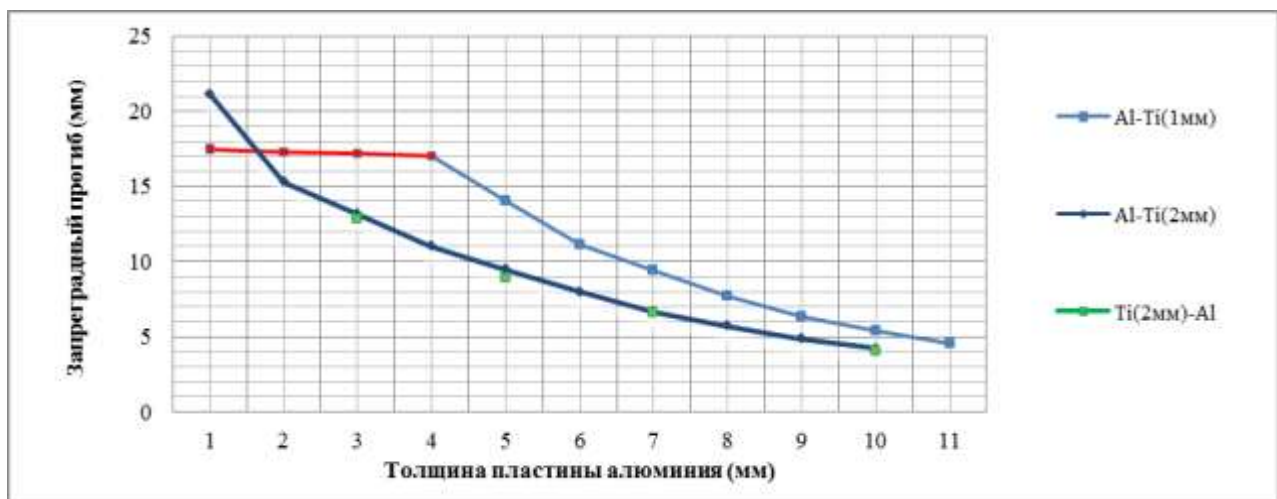


Рис. 3 – Зависимость величин прогиба многослойных пластин

На рисунке 4 представлены результаты моделирования разрушения многослойной панели керамика/титан, с внешним керамическим слоем. В первом случае толщиной титана была 2 мм, керамики 1 мм,

ударник разрушил керамику и деформировал подложку. Во втором случае толщина титана была 5 мм, керамики 5 мм, ударник деформировался при столкновении и не пробил пластину. На рисунке 5 представ-

лены результат моделирования разрушения многослойных панелей алюминий/керамика/титан. На рисунке 5 а. толщина титана 2мм, керамики 2мм, алюминия 2мм, ударник не пробивает пластину, а слой алюминия сдерживает разрушенную керамику. На

рисунке 5 б. толщина титана 10мм, керамики 2мм, алюминия 2мм, ударник не пробивает пластину, разрушает керамический и алюминиевые слои, ударник деформируется и останавливается.

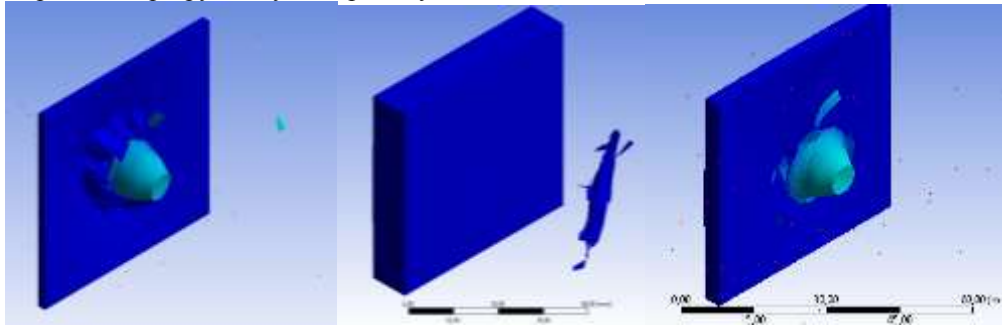


Рис. – 4 Разрушения пластины титана с внешним керамическим слоем

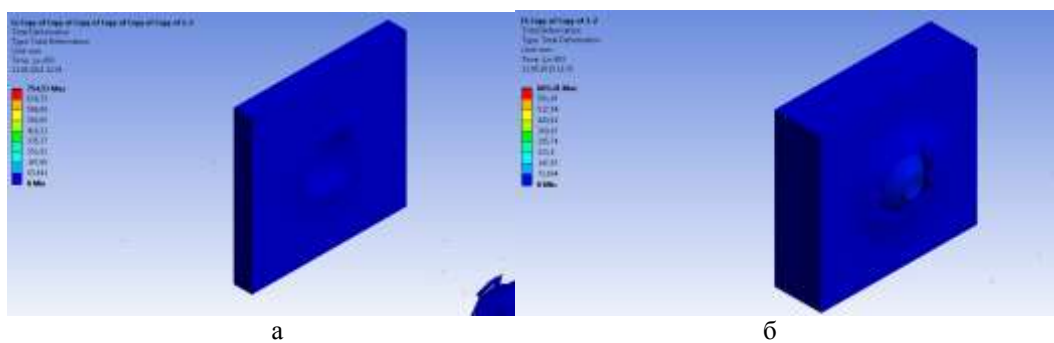


Рис. – 5 Разрушения пластины Al - В₄С- Тi

Выводы. Установлено соотношение толщин лицевых и тыльных пластин в комбинированных многослойных преградах, обеспечивающее снижение проникающей способности ударника. Получены зависимости деформирования и разрушения пластин при вариации толщин лицевого и тыльного слоев преграды, а также материала этих пластин, смоделирована динамика процесса внедрения и разрушения ударника. Получены величины прогиба пакетов при варьировании их толщин.

Применение керамики значительно увеличивает ударную прочность многослойных пластин. А применение керамики как промежуточного слоя повышает живучесть этих пластин и как следствие деталей машин.

Список литературы: 1. Доброворский С.С. Повышение конкурентоспособности отечественного машиностроительного производства в современных условиях // С.С. Доброворский, Е.В. Басова, Л.Г. Добровольская, А.К. Мялица // Сборник научных трудов "Вестник

НТУ "ХПИ" : Технологии в машиностроении. Х.: НТУ «ХПИ», 2014. – Вып.42. – С. 25-31. 2. Johnson G.R., Holmquist T.J. An Improved Computation Constitutive Model for Brittle Material // *High Pressure Science and Technology*. – NY: AIP Press, 1994. 3. Ravid M., Bodner P.R., Chochron I.P. Penetration analysis of ceramic armor with composite material backing // *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Ballistic P.* – Interlaken, Switzerland, 2001.

Bibliography (transliterated): 1. Dobrovorskiy P.P., Basova E.V., Dobrovol'skaja L.G., Mjalica A.K. Povyshenie konkurentosposobnosti otechestvennogo mashinostroitel'nogo proizvo-dstva v sovremennykh usloviyakh. Kharkov: NTU «KhPI», 2014. Print. 2. Dragobetskiy V.V. Sovershenstvovaniye svoystv instrumental'nykh materialov metodami vzyryvnoy obrabotki / Dragobetskiy V.V. Pirogov V.V. Naumova Ye.A. // *Visnik SevNTU. ViP. 107: Mashinoprikladobuduvannya ta transport: zb. nauk. pr.* – Sevastopol: Vid-vo SevNTU, 2010. 3. Petrov E.V. Vozdeystviye na stali potoka tugoplavkikh chastits, Razognannykh energiyey vzyryva: avtoferat ... kandidata tekhnicheskikh nauk: 02.02.11 / Petrov Yevgeniy Vladimirovich. – Chernogolovka, 2011.– 21 p.

Поступила (received) 05.10.2015

Доброворский Сергей Семенович – док. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ», тел.: (057)-720-66-25, e-mail: sdobro@mail.ru;

Dobrovorskiy Serhei Semenovych – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25, e-mail: sdobro@mail.ru;

Гнучих Сергей Сергеевич – аспирант НТУ «ХПИ» тел.: (057)-720-66-25 e-mail: gny4ix@mail.ru;

Нпучых Сергей Сергеевич – graduate student, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25, e-mail: gny4ix@mail.ru;

Добровольская Людмила Георгиевна – канд. техн. наук, доцент НТУ «ХПИ» тел.: (057)-720-66-25;

Dobrovol'skaia Liudmyla Heorhyevna – Candidate of Technical Sciences, Docent, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25.

УДК 621.923

Ф. В. НОВИКОВ, И. А. РЯБЕНКОВ

УСЛОВИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО ШЛИФОВАНИЯ С НАЧАЛЬНЫМ НАТЯГОМ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Аналитически описан характер изменения во времени силы резания, интенсивности съема материала и величины упругого перемещения при шлифовании с начальным натягом в технологической системе. Показано, что эти параметры уменьшаются с течением времени обработки, обеспечивая требуемые показатели точности и качества обрабатываемых поверхностей. Это указывает на эффективность ее применения на окончательном этапе шлифования для обеспечения высокой точности обработки.

Ключевые слова: шлифование, технологическая система, начальный натяг, точность обработки, сила резания, упругое перемещение, припуск.

Введение. Повышение точности и качества обработки деталей машин из закаленных сталей требует применения эффективных процессов шлифования, обеспечивающих работу круга в режиме самозатачивания или периодической правки с целью поддержания его высокой режущей способности. К таким процессам следует отнести шлифование по упругой схеме и шлифование с заданным начальным натягом в технологической системе. Эти процессы позволяют регулировать изменение силы резания, исключая ее увеличение во времени, что важно при шлифовании с низкой жесткостью технологической системы. Для эффективного использования этих процессов шлифования необходимо знать их технологические возможности, основанные на результатах как экспериментальных, так и теоретических исследований. В связи с этим, представляется важным и актуальным разработка математической модели определения силы резания, интенсивности съема материала и величины упругого перемещения в технологической системе при шлифовании. Это позволит научно обоснованно подойти к установлению оптимальных параметров обработки, обеспечивающих требуемые показатели точности, качества и производительности.

Анализ последних достижений и литературы.

Исследование технологических параметров процесса шлифования с заданным начальным натягом в технологической системе нашло отражение в работах [1, 2]. В них приведены результаты экспериментальных исследований шлифования абразивными и алмазными кругами, в частности алмазно-искрового шлифования [3], основанного на введении в зону резания дополнительной электрической энергии в форме электрических разрядов. Это позволяет фактически исключить трение связки круга с обрабатываемым материалом и существенно повысить технологические показатели обработки. Показано также [1], что именно при работе абразивного круга в режиме затупления целесообразно использовать схему шлифования с начальным натягом в технологической системе. Это гарантированно обеспечивает снижение силы резания во времени и достижение требуемых показателей точности и шероховатости обработанной поверхности. Однако, до настоящего времени в научно-технической литературе отсутствуют теоретические (аналитические) основы указанного процесса шлифования, что не позволяет в полной мере раскрыть его физическую сущность и выявить технологические возможности, а

также научно обоснованно подойти к проектированию технологических процессов шлифования.

Цель работы, постановка проблемы. Целью работы является повышение точности, качества и производительности обработки при шлифовании с начальным натягом в технологической системе. Основной задачей работы является аналитическое описание технологических закономерностей формирования упругих перемещений, возникающих в технологической системе рассматриваемого процесса шлифования, и определение оптимальных условий его осуществления.

Материалы исследований. На практике, наряду с шлифованием по жесткой и упругой схемам, получила применение схема шлифования с начальным натягом в технологической системе, соответствующая, по сути, известной схеме выхаживания. Данная схема обеспечивает высокие показатели точности и качества обрабатываемых поверхностей за счет снижения силовой напряженности процесса обработки. В связи с этим важно провести теоретический анализ силовой напряженности данной схемы шлифования и упругих перемещений, возникающих в технологической системе и определяющих параметры точности обработки.

По физической сути рассматриваемая схема шлифования аналогична упругой схеме шлифования, осуществляемой с переменным (уменьшающимся во времени) радиальным усилием P_y , соответствующим радиальной составляющей силы резания. Это усилие равно упруго-восстанавливающей силе, возникающей в процессе шлифования [4]:

$$P = c \cdot (P - V_{\text{дем.ср}} \cdot \tau), \quad (1)$$

где P – величина снимаемого припуска, равная начальному натягу в технологической системе, м;

c – приведенная жесткость технологической системы, Н/м;

$V_{\text{дем.ср}}$ – средняя скорость съема материала за время обработки τ , м/с.

С учетом известного соотношения $P_y = \frac{\sigma}{K_{\text{рез}}} \cdot \frac{F \cdot V_{\text{дем.ср}}}{V_{\text{кр}}}$ [1] и указанного выше условия

$P_y = P$, получено:

$$V_{\text{дем.ср}} = \frac{\Pi}{\left(\tau + \frac{\sigma \cdot F}{K_{\text{рез}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}}} \right)}, \quad (2)$$

где σ – условное напряжение резания, Н/м²;

$K_{\text{рез}} = P_z / P_y$ – коэффициент резания;

P_z – тангенциальная составляющая силы резания, Н;

F – площадь поперечного сечения обрабатываемой прямолинейной детали, м²;

$V_{\text{кр}}$ – скорость круга, м/с.

Как следует из зависимости (2), с течением времени обработки τ средняя скорость съема материала $V_{\text{дем.ср}}$ уменьшается, причем в большей степени при меньшем значении второго слагаемого, входящего в знаменатель зависимости.

Радиальная P_y составляющая силы резания с учетом зависимости (2) и условия $P_y = P$ выразится:

$$P_y = \frac{c \cdot \Pi}{\left(1 + \frac{K_{\text{рез}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}} \cdot \tau}{\sigma \cdot F} \right)}. \quad (3)$$

Увеличение времени обработки τ , аналогично характеру изменения средней скорости съема материала $V_{\text{дем.ср}}$, приводит к уменьшению P_y . Этим и объясняется эффективность практического использования схемы шлифования с начальным натягом в технологической системе, поскольку на конечном этапе обработки выполняется условие $P_y \rightarrow 0$, а это способствует уменьшению величины упругого перемещения y , возникающего в технологической системе [5]:

$$y = \frac{P_y}{c} = \frac{\Pi}{\left(1 + \frac{K_{\text{рез}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}} \cdot \tau}{\sigma \cdot F} \right)}, \quad (4)$$

и повышению показателей точности и качества обрабатываемой поверхности, производительности обработки.

Необходимо отметить, что добиться повышения технологических показателей обработки в этом случае, исходя из зависимости (3), можно при условии $\frac{K_{\text{рез}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}} \cdot \tau}{\sigma \cdot F} > 1$. В противном случае выполняется условие $P_y \rightarrow c \cdot \Pi$, справедливое для упругой схемы шлифования. В итоге сложно добиться повышения технологических показателей обработки.

Несомненно, упругая схема шлифования, как показано выше, исключает отрицательное влияние времени обработки τ на силу резания, что имеет место

при шлифовании по жесткой схеме. Однако упругая схема шлифования уступает рассматриваемой схеме шлифования с начальным натягом в технологической системе с точки зрения обеспечения качества и точности обрабатываемых поверхностей.

Основным ограничением схемы шлифования с начальным натягом в технологической системе является величина начального натяга Π , которая должна принимать небольшие значения – меньшие величины снимаемого припуска. В этом случае съем заданного припуска следует производить за несколько переходов, периодически создавая в технологической системе начальные натяги, кратные величине припуска, что, несомненно, приводит к снижению эффективности процесса шлифования, связанной со снижением производительности обработки.

Полученное теоретическое решение справедливо для схемы шлифования с непрерывной скоростью радиальной подачи, реализуемой, например, при круглом врезном шлифовании с непрерывной во времени скоростью радиальной подачи S (рис. 1).

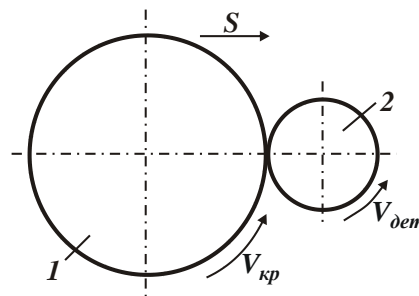


Рис. 1 – Схема круглого врезного шлифования:
1 – круг; 2 – деталь.

Вместе с тем, на практике получили применение схемы круглого и плоского шлифования с дискретной во времени скоростью радиальной подачи. Поэтому важно установить характер изменения съема материала для этой схемы шлифования на этапе выхаживания, т.е. при отключенной радиальной подаче, когда съем обрабатываемого материала происходит лишь под действием возникающей упруговосстанавливающей силы:

$$P = c \cdot (\Pi - n \cdot t_{\phi}), \quad (5)$$

где Π – величина снимаемого припуска при плоском шлифовании, м;

n – количество проходов круга при шлифовании;

t_{ϕ} – фактическая глубина шлифования на проходе, м.

В процессе выхаживания при плоском шлифовании сила P равна радиальной составляющей силы резания P_y , которая выражается следующей аналитической зависимостью:

$$P_y = \frac{\sigma}{K_{\text{рез}}} \cdot \frac{B \cdot V_{\text{дем}} \cdot t_{\phi}}{V_{\text{кр}}}, \quad (6)$$

где B – ширина шлифования, м;
 $V_{\text{дем}}$ – скорость вращения детали, м/с.

Подчиняя зависимость (6) условию $P_y = P$, получено уравнение относительно неизвестной величины – фактической глубины шлифования на проходе t_ϕ :

$$\frac{\sigma}{K_{\text{рез}}} \cdot \frac{B \cdot V_{\text{дем}} \cdot t_\phi}{V_{\text{кр}}} = c \cdot (\Pi - n \cdot t_\phi). \quad (7)$$

Откуда

$$t_\phi = \frac{\Pi}{\left(n + \frac{\sigma \cdot B \cdot V_{\text{дем}}}{K_{\text{рез}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}}} \right)}. \quad (8)$$

Как видно, зависимость (8) аналогична зависимости (2) с тем отличием, что вместо времени обработки τ в зависимость (8) входит параметр n . Следовательно, все выводы, сделанные при анализе зависимости (2), остаются справедливыми и для зависимости (8). Так, с увеличением количества проходов n фактическая глубина шлифования на проходе t_ϕ непрерывно уменьшается, уменьшая величину упругого перемещения, возникающего в технологической системе, и тем самым повышая точность обработки. При этом интенсивность уменьшения фактической глубины шлифования на проходе t_ϕ тем больше, чем меньше второе слагаемое, которое входит в знаменатель зависимости (8), т.е. чем меньше отношение $\sigma/K_{\text{рез}}$, параметры B , $V_{\text{дем}}$ и больше c и $V_{\text{кр}}$. Все это способствует повышению точности обработки.

Радиальная P_y составляющая силы резания с учетом зависимости (8) принимает вид:

$$P_y = \frac{c \cdot \Pi}{\left(1 + \frac{K_{\text{рез}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}} \cdot n}{\sigma \cdot B \cdot V_{\text{дем}}} \right)}. \quad (9)$$

С увеличением количества проходов n радиальная P_y составляющая силы резания уменьшается, что обеспечивает уменьшение величины упругого перемещения y , возникающего в технологической системе

$$y = \frac{P_y}{c} = \frac{\Pi}{\left(1 + \frac{K_{\text{рез}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}} \cdot n}{\sigma \cdot B \cdot V_{\text{дем}}} \right)}, \quad (10)$$

и соответственно повышение точности и качества обрабатываемой поверхности, производительности обработки.

Как и в зависимости (3), добиться повышения технологических показателей обработки в этом слу-

чае можно при условии $\frac{K_{\text{рез}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}} \cdot n}{\sigma \cdot B \cdot V_{\text{дем}}} > 1$. В противном случае выполняется условие $P_y \rightarrow c \cdot \Pi$ и реализуется упругая схема шлифования, а это не позволит повысить показатели точности и качества обрабатываемой поверхности, а соответственно и производительность обработки от применения схемы шлифования с начальным натягом в технологической системе.

Добиться выполнения условия $\frac{K_{\text{рез}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}} \cdot n}{\sigma \cdot B \cdot V_{\text{дем}}} > 1$

наиболее просто за счет увеличения отношения $K_{\text{рез}}/\sigma$ или уменьшения условного напряжения резания σ путем обеспечения высокой остроты режущего рельефа круга. Эффективным в этом направлении является применение прогрессивных методов правки и обеспечение работы круга в режиме самозатачивания с целью уменьшения интенсивности трения связи круга с обрабатываемым материалом.

Важным условием увеличения второго слагаемого в знаменателе зависимости (10) следует рассматривать увеличение приведенной жесткости технологической системы c , т.к. уменьшение параметров B , $V_{\text{дем}}$ и Π , по сути, ведет к снижению производительности обработки. Увеличение количества проходов круга при шлифовании n также приводит к снижению производительности обработки, поэтому целесообразно шлифование производить за несколько проходов круга, обеспечивая выполнение условия $\frac{K_{\text{рез}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}} \cdot n}{\sigma \cdot B \cdot V_{\text{дем}}} > 1$ за счет увеличения отношения

$K_{\text{рез}}/\sigma$ и приведенной жесткости технологической системы c . Следовательно, несмотря на то, что второе слагаемое в знаменателе зависимости (10) включает достаточно большое количество параметров, изменяя которые можно добиться уменьшения этого слагаемого, на практике возможна реализация всего лишь двух условий (это увеличение $K_{\text{рез}}/\sigma$ и c), которые не приводят к снижению производительности обработки. Очевидно, наиболее просто реализуется первое условие за счет выбора оптимальных характеристик шлифовального круга.

Как отмечалось выше, схему шлифования с начальным натягом в технологической системе эффективно использовать при низкой жесткости технологической системы. В связи с этим она получила достаточно широкое применение на операциях шлифования деталей гидроаппаратуры, где требуется обеспечить высокие показатели точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей, в частности, при шлифовании отверстий диаметром 6 – 10 мм в кольцах из высокотвердых магнитных сплавов АН-КО-3А и ЮНДК-18 (HRC 62–63) [6]. Так, экспериментально установлено, что в связи с низкой жесткостью технологической системы (300 Н/мм) величина упругого перемещения при внутреннем шлифовании с

течением времени обработки непрерывно увеличивается (фактически по линейному закону). Это ограничивает возможности применения шлифования по жесткой схеме. Исходя из этого, целесообразно перейти к упругой схеме шлифования, создавая в технологической системе периодически натяги и осуществляя обработку, по сути, по схеме выхаживания. Например, установлено, что при начальном натяге 0,05 мм съём припуска величиной 0,8 мм может быть произведен за 16 этапов создания в технологической системе начальных натягов. Продолжительность каждого этапа составляет приблизительно 7,5 минут, а припуск величиной 0,8 мм удаляется за 120 минут, тогда как по действующей технологии внутреннего шлифования (по жесткой схеме) продолжительность обработки составляет 3,2 часа. Следовательно, переход от жесткой схемы шлифования к схеме шлифования с начальным натягом в технологической системе позволяет сократить время обработки более чем в 1,5 раза. Причем, данная схема шлифования была использована для решения задачи повышения производительности обработки при съеме значительных припусков, одновременно обеспечивая и повышение качества обработки за счет снижения силовой напряженности процесса шлифования.

Выводы. В работе аналитически описан характер изменения во времени силы резания, интенсивности съема материала и величины упругого перемещения, возникающего в технологической системе, при шлифовании с начальным натягом в технологической системе. Показано, что все эти параметры уменьшаются с течением времени обработки, обеспечивая требуемые (высокие) показатели точности и качества обрабатываемых поверхностей. Теоретически установлено, что по интенсивности изменения этих показателей во времени рассматриваемая схема шлифования превосходит упругую схему шлифования. Это указывает на эффективность ее применения на окончательном этапе операции шлифования при условии низкой жесткости технологической системы для обеспечения высоких показателей точности обработки. Приведены примеры эффективного практического использования данной схемы шлифования. Так, при обработке отверстий диаметром 6 – 10 мм в кольцах из высокотвердых магнитных сплавов АНКО-3А и ЮНДК-18 (HRC 62–63) переход от жесткой схемы

шлифования к схеме шлифования с начальным натягом в технологической системе позволило сократить время обработки более чем в 1,5 раза.

Список литературы: 1. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Т. 1. "Механика резания материалов" – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с. 2. Лурье Г. Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования / Г. Б. Лурье. – Л.: Машиностроение, 1984. – 103с. 3. Беззубенко Н. К. Повышение эффективности алмазного шлифования путем введения в зону обработки дополнительной энергии в форме электрических разрядов: автореф. дис. на соискание научн. степени докт. техн. наук: спец. 05.03.01 "Процессы механической обработки, станки и инструменты" / Н. К. Беззубенко. – Харьков, 1995. – 56 с. 4. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Т. 3. "Резание материалов лезвийными инструментами" – Одесса: ОНПУ, 2003. – 546 с. 5. Рябенков И. А. Оценка влияния интенсивности трения связки круга с обрабатываемым материалом на эффективность процесса шлифования / И. А. Рябенков, Ф. В. Новиков // Вісник НТУ "ХПІ". Збірник наукових праць. – Х.: НТУ "ХПІ", 2014. – № 43 (1086). – С. 143–147. 6. Новиков Ф. В. Повышение эффективности обработки отверстий в деталях из высокотвердых магнитных сплавов / Ф. В. Новиков, И. А. Рябенков, В. И. Полянский // Инженерия поверхности и реновация изделий: материалы научн.-техн. конф., 03-07 мая 2013 г., г. Ялта. – Киев: АТМ України, 2013. – С. 205-207.

Bibliography (transliterated): 1. Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologiy mashinostroeniya / pod obsh. red. F. V. Novikova i A. V. Yakimova. V 10 tomakh. – Vol. 1. "Mekhanika rezaniya materialov" – Odessa: ONPU, 2002. – 580 P. 2. Lurye G. B. Progressivnye metody kruglogo naruzhnogo shlifovaniya / G. B. Lurye. – Leningrad: Mashinostroenie, 1984. – 103 P. 3. Bezzubenko N. K. Povyshenie effektivnosti almaznogo shlifovaniya putem vvedeniya v zonu obrabotki dopolnitelnoy energii v forme elektricheskikh razryadov: avtoref. diP. na soiskanie nauthn. stepeni dokt. tekhn. nauk: spetP. 05.03.01 "Protessy mekhanicheskoy obrabotki, stanki i instrumenty" / N. K. Bezzubenko. – Kharkov, 1995. – 56 P. 4. Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologiy mashinostroeniya / pod obsh. red. F. V. Novikova i A. V. Yakimova. V 10 tomakh. – Vol. 3. "Rezanie materialov lezviynymi instrumentami" – Odessa: ONPU, 2003. – 546 P. 5. Ryabekov I. A. Otsenka vliyaniya intensivnosti treniya svyazki kruga s obrabatyvaemym materialom na effektivnost protsesssa shlifovaniya / I. A. Ryabekov, F. V. Novikov // Visnyk NTU "KhPI". Zbirnyk naukovykh pratP. – Kh.: NTU "KhPI", 2014. – No 43 (1086). – P. 143–147. 6. Novikov F. V. Povyshenie effektivnosti obrabotki otverstiy v detalyakh iz vysokotverdykh magnitnykh splavov / F. V. Novikov, I. A. Ryabekov, V. I. Polyanskiy // Ingereniya poverkhnosti i renovatsiya izdeliy: materialy nauthn.-tekhn. konf., 03-07 maya 2013 g., g. Yalta. – Kiev: ATM Ukrainy, 2013. – P. 205-207.

Поступила (received) 10.10.2015

Новиков Федор Васильевич – доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный экономический университет имени С. Кузнеця, и.о. заведующего кафедрой "Естественные науки и технологии"; тел.: (067) 6890342; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

Novikov Fedor Vasilyovich – Doktor of Technical Sciences (Ph. D.), Full Professor, Харьковский национальный экономический университет имени С. Кузнеця, и.о. заведующего кафедрой "Естественные науки и технологии"; тел.: (067) 6890342; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

Рябенков Игорь Александрович – кандидат технических наук, ведущий инженер-технолог, Государственное предприятие Харьковский машиностроительный завод "ФЭД"; тел. (057) 7596631; e-mail: rigor0212@gmail.com

Ryabekov Igor Aleksandrovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Lead Engineer, State Enterprise Kharkiv Machine-Building Plant "FED"; тел. (057) 7596631; e-mail: rigor0212@gmail.com

УДК 519.874

Г.И. КОСТЮК, В.Н. ПАВЛЕНКО, Ю.В. ШИРОКИЙ**ПЕРСПЕКТИВЫ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОСТРУКТУР ПРИ ДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СТАЛИ**

На основе решения совместной задачи теплопроводности и термоупругости получены поля температур при действии импульсного лазерного излучения на стали 20, 40, 45, 40X, У8, У12 с учетом критериев: требуемые температуры – 500...1500 К, необходимые скорости нарастания температур – более 10^7 К/с. Определены технологические параметры лазерной обработки (плотность теплового потока, время его действия) для образования наноструктур.

Ключевые слова: наноструктуры, лазерное излучение, стали.

Введение. Наноструктурные поверхностные слои позволяют существенно повысить работоспособность деталей путем повышения микротвердости поверхности, снижения модуля упругости при повышении предела текучести и ударной вязкости, что дает возможность создавать на деталях поверхностные слои, обеспечивающие повышение ресурса деталей, работающих при ударных нагрузках и гарантирующих их длительную прочность.

Работа выполнялась в рамках программы Министерства образования и науки Украины «Новые и ресурсосберегающие технологии в энергетике, промышленности и агропромышленном комплексе» (подсекция 13 «Аэрокосмическая техника и транспорт») и по темам: «Создание физико-технических основ повышения качества материалов аэрокосмических конструкций» и «Разработка технологических основ интегрированных технологий плазменно-ионной обработки деталей аэрокосмической техники» (подсекция 6 «Физико-технические проблемы материаловедения»), «Концепция создания наноструктур, нано- и традиционных покрытий с учетом влияния адгезии на эффективность и работоспособность деталей АТ, АД и РИ», «Экспериментально-теоретическое исследование получения наноструктур при действии ионных и светолучевых потоков на конструкционные материалы и РИ», хоздоговорных работ и договоров о сотрудничестве.

Анализ последних исследований и литературы. В настоящее время недостаточно теоретических работ, которые позволяют прогнозировать размер зерна в зависимости от технологических параметров обработки [1–4], особенно для режущих инструментов [5–7], а при действии ионизирующего излучения таких исследований нет. Все это свидетельствует о том, что получение наноструктур при действии ионизирующего излучения – важная, актуальная и своевременная задача.

Целью работы является прогнозирование технологических параметров лазерной обработки, необходимых для получения наноструктур в материале (плотность теплового потока, время его действия).

Постановка проблемы. Как показали наши опыты, представленные в работах [1–5], несмотря на то, что экспериментально были получены наноструктуры при действии ионизирующего излучения, теоретически вопрос возможности получения наноструктур не

рассматривался. Все это связано с тем, что не были сформулированы критерии получения наноструктур (НС), которые образуются только в диапазоне температур 500...1500 К при скорости нарастания температур более 10^7 К/с, а также интенсифицируются действием нестационарных температурных напряжений порядка 10^8 ... 10^{10} Па. Кроме того, время действия температур должно быть таким, чтобы процесс роста размера зерна при длительном действии температуры не реализовался. Тогда эти критерии можно расширить следующим: время остывания до температур, близких к 500 К, должно быть не более $e \cdot \tau_u$ (τ_u – время действия импульса излучения), что обеспечит стабильность формирования НС.

Материалы исследований. Проведено исследование действия лазерного излучения на стали 20, 40, 45, 40X, У8, У12 для выявления технологических параметров, при которых реализуются наноструктуры.

Действие лазерного излучения на конструкционные материалы**1. Особенности описания источника тепла****при действии лазера на непрозрачные материалы**

В технологических целях используют фокусированный источник когерентного излучения, плотность теплового потока которого распределена в фокальной плоскости следующим образом:

$$q(r) = q_0 \left[\frac{2I_1(Br)}{(Br)^2} \right]^2, \quad (1)$$

где $I_1(Br)$ – функция Бесселя первого рода первого порядка;

$$B = I_1 D / \lambda F. \quad (2)$$

Здесь D – диаметр линзы; λ – длина волны излучения; F – фокусное расстояние; q_0 – интенсивность в центре пятна, рассчитываемая по формуле

$$q_0 = \frac{I_1 D^2}{4\lambda^2 F^2} P_0, \quad (3)$$

где P_0 – мощность излучения, поглощенная материалом.

Плотность теплового потока может быть получена от произведения функции, зависящей только от времени, и функции координат поверхности:

$$q_n(r\tau) = A \varphi(\tau) q(r). \quad (4)$$

Здесь A – поглощательная способность обраба-

тываемого материала, зависящая в общем случае как от состояния поверхности (степени обработки, шероховатости), так и от ее температуры; $q(r)$ – пространственное распределение мощности излучения, рассчитываемое по формуле (1) с учетом (2) и (3); $\varphi(\tau)$ – описывает временную структуру импульса; например, для импульса лазера, работающего в пучковом режиме с упорядоченной генерацией, функция может быть представлена в виде

$$\varphi(\tau) = (1 - \cos \omega\tau). \quad (5)$$

Для огибающей пиков справедливо выражение

$$\varphi(\tau) = \tau^n \exp(br^m), \quad (6)$$

где n и m – некоторые числа (целые или дробные).

Модулирование добротности лазера позволяет получить моноимпульсы излучения длительностью $\approx 10^{-8}$ с, временная структура которых может быть описана функцией, близкой к треугольной, крутизна переднего фронта может быть отличной от крутизны заднего.

Падающий на поверхность материала световой поток частично отражается, а остальная часть его проходит внутрь объема тела и поглощается. Внутри и на поверхности тела действует тепловой источник, распределенный в пространстве и времени.

Плотность поглощенного теплового потока практически для всех технологических применений лазера изменяется внутри объема материала по закону Бугера

$$q_V(z) = q_{V_0}(1 - R)e^{-\alpha z}, \quad (7)$$

где $q_V(z)$, q_{V_0} – соответственно объемные плотности теплового потока излучения на расстоянии z и на поверхности, Вт/см³:

$$q_{V_0} = \frac{q_n(r, \tau)}{0,1\delta}. \quad (8)$$

Здесь $\delta \approx 10^{-4} \dots 10^{-5}$ м – слой, в котором световой поток поглощается при взаимодействии с электронами проводимости; R и α – соответственно отражательная способность и коэффициент поглощения света.

2. Модель взаимодействия светолучевых потоков и конструкционных материалов

С учетом действия объемного источника и облучения, объемную плотность которого рассчитывают по выражению (7) на основе (8), и поверхностного источника тепла с плотностью теплового потока по выражению (4) с учетом (5), (6) решают уравнения теплопроводности.

2.1. Баланс тепла в элементарном объеме детали

Баланс тепла представлен в выражении

$$\begin{aligned} c[T]\gamma[T] \frac{dT(x, y, z, t)}{dt} + c[T]\gamma[T] \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial y} V_n + c[T]\gamma[T] r_p \frac{d^2 T(x, y, z, t)}{dt^2} = \\ = \nabla \lambda [T] \nabla T(x, y, z, t) + C[T]\gamma[T] V_m \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} - AL_{III} \gamma [T] \frac{dV_{n3}}{dt} + \\ + B \frac{q_n(r, \tau)}{0,1\delta} \pm D \frac{dW(x, y, z, t)}{dt} \pm m_a C_a [T_a] \frac{dn_a}{dt} (T_a - T(x, y, z, t)) \pm \\ \pm P_{T.X.P.} (n_A, n_B, T, t_e) \frac{dn_{A(B)}}{dt} L_{T.X.P.} + q_v(z), \end{aligned}$$

где $C[T]$ и $\gamma[T]$ – теплоемкость и плотность материала

мишени, соответствующие температуре T ; τ_p – время релаксации температуры на один кельвин; V_n – скорость перемещения плазменного потока лазерного излучения или мишени относительно него; L_{III} и $L_{T.X.P.}$ – удельные теплота плавления и термохимической реакции; $V_{\phi}[T]$ – скорость смещения фронта испарения; V_{III} – объем расплавленного металла; $W(x, y, z, t)$ – энергия деформирования единичного объема мишени; m_a – масса диффундирующего атома; $C_a[T_a]$ – теплоемкость диффундирующего материала при температуре T_a ; $P_{T.X.}$ (n_A, n_B, T, t_{B3}) – вероятность термохимической реакции, зависящая от концентрации реагентов n_A и n_B , температуры T и времени взаимодействия t_{B3} ; n_A и n_B – концентрации реагентов, определяющих возможность реакции.

Изменение количества тепла в единичном объеме (первое слагаемое в левой части равенства) реализуется вследствие перемещения потока лазерного излучения вдоль обрабатываемой поверхности или перемещения мишени относительно потока лазерного излучения со скоростью V_n (второе слагаемое); теплофизических процессов: влияния на теплообмен конечной скорости распространения тепла (третье слагаемое), теплопроводности (первое слагаемое справа), смещения фронта испарения (второе слагаемое), плавления (третье слагаемое); столкновительных процессов: объемного источника тепла под действием лазерного излучения (четвертое слагаемое), термоупругих, термопластических и термоусталостных процессов, определяющих энергию деформирования материала элементарного объема (пятое слагаемое); диффузионных процессов, определяющих теплоперенос диффундирующим материалом (шестое слагаемое); термохимических процессов, связанных с реализацией химических реакций между материалом детали и материалом покрытия или же между компонентами сплавов и композитных материалов, объемного источника тепла под действием светолучевого потока.

Теперь рассмотрим подробнее, как рассчитать каждое значение в формуле (9). Используя дискретные значения теплоемкости при различной температуре, зависимость теплоемкости от температуры можно выразить эмпирической формулой

$$C[T] = (a + b(T - 273) + c(T - 273)^2) \cdot 4186,8, \quad (10)$$

где a, b, c – коэффициенты, значения которых приведены в [6] для различных материалов.

Для определения зависимости изменения плотности материала от температуры можно также пользоваться эмпирической формулой

$$\gamma[T] = d - e(T - 273), \quad (11)$$

где d и e – коэффициенты, выбираемые в зависимости от материала [6].

Так, например, для хромистых нержавеющей сталей 1X13, 2X13, 3X13 и 4X13 $d = 7700$, $e = 0,286$, а для аустенитных хромоникелевых сплавов X18N9 и X18N25C2 – $d = 7920$, $e = 0,410$.

В случае, когда поток лазерного излучения не перемещается вдоль поверхности мишени, второе слагаемое слева в формуле (9) обращается в нуль. Если же имеется перемещение потока параллельно

обрабатываемой поверхности, то V_n – это скорость по координате u .

В третьем слагаемом слева учитывается конечная скорость распространения тепла. Время релаксации тепловых колебаний можно вычислить по формуле из [1].

В первом слагаемом справа учтено изменение количества тепла под влиянием теплопроводности. Зависимость коэффициента теплопроводности λ от температуры в каждый момент времени представляется эмпирическими зависимостями [6].

Во втором слагаемом справа формулы (9), учитывая смещение фронта испарения, скорость испарения материала $V_{исп}$ при температуре, меньшей температуры плавления материала детали (ленгмюровский механизм), рассчитывают по формуле Дэшмана

$$V_{tm} = \frac{10^4}{\gamma_m} \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} \left(\exp\left(A - \frac{B}{T}\right) - P_{i\dot{n}o} \right), \quad (12)$$

где A и B – табулированные константы, значения которых приведены в [8], R – газовая постоянная; γ_m – плотность материала детали; M – молекулярный вес материала детали; $P_{ост}$ – остаточное давление газов.

При испарении из слоя расплавленного металла (френкелевский механизм [8]) скорость испарения определяется формулой

$$V_{\phi} = V_0 \exp\left(\frac{T^*}{T(O, x, y, z, t)}\right), \quad (13)$$

где V_0 и T^* – критическая скорость испарения и температура поверхности [2].

В третьем слагаемом справа формулы (9) учитывается изменение количества тепла при плавлении и рассчитывается для того объема материал $V_{пл}$, в котором определяемая температура превышает температуру плавления. Удельную теплоту плавления $L_{пл}$ можно вычислить по формуле

$$L_{пл} = nT_{пл} f(T_{пл}) \cdot 4186,8, \quad (14)$$

где n – число атомов в молекуле; $f(T_{пл})$ – функция зависимости $L_{пл}$ от $T_{пл}$, которую приближенно можно выразить как линейную зависимость вида

$$f(T_{пл}) = (1,57T_{пл} + 1428) \cdot 10^{-3}. \quad (15)$$

Например, для железа $f(T_{пл}) = 3,5$ кал/г. Удельную теплоту плавления $L_{пл}$ в формуле (12) измеряют в калориях на грамм.

В четвертом слагаемом формулы (9) вычисляется изменение количества тепла под действием лазерного излучения как объемного источника тепла.

В пятом слагаемом формулы (9) учитывается энергия, затрачиваемая на деформирование тела за время действия теплового источника t_u , и возвращаемая материалу энергия при релаксации напряжений (за время, большее t_u и меньшее $t_u + \tau_p$).

Энергию деформирования единичного объема определим по формуле

$$W = G \left[\begin{aligned} &\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{yy}^2 + \varepsilon_{zz}^2 + 2(\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{zx}^2) + \\ &+ \frac{\mu}{1-\mu} \ell^2 - \frac{2(1+\mu)\alpha_1}{1-2\mu} \ell(T(x, y, z, t) - T) \end{aligned} \right], \quad (16)$$

где $2\varepsilon_{ik} = 2\varepsilon_{ki} = \frac{\partial u_k}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_k}$ ($k, i = x, y, z$);

$\ell = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$; $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$ – удлинения; $\varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{zx}$ – сдвиги относительно соответствующих осей; u_x, u_y, u_z – перемещения относительно соответствующих осей; α_1 – коэффициент линейного расширения материала мишени; μ – коэффициент Пуассона (отношение поперечной деформации к продольной, значения μ заключены между 0,1 и 0,5); G – модуль сдвига (модуль второго рода) (для железа $G = 3,5 \dots 10,3 \cdot 10^{10}$ Н/м², $\mu = 0,23 \dots 0,31$); T_n – начальная температура.

Зависимость коэффициента линейного расширения материала от температуры аппроксимируется линейной функцией [6].

Деформации сдвигов ε_{ik} не могут задаваться произвольно, они связаны дифференциальными соотношениями – условиями совместности [1]. Этими условиями проверяется правильность определения удлинений и сдвигов, а их корректировка – вводом дополнительных напряжений. Для определения удлинений $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$ и сдвигов $\varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{zx}$ воспользуемся выражением термоупругого потенциала перемещений Φ :

$$\Delta\Phi - \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)G} \gamma \frac{\partial^2 \Phi}{\partial a^2} = \frac{1+\mu}{1-\mu} \alpha_1 [T(x, y, z, t) - T_n], \quad (17)$$

где γ – плотность материала детали. По величине термоупругого потенциала перемещений и по известным соотношениям находим величины удлинений и сдвигов [1].

Величины температурных напряжений определим по выражению

$$\sigma_{ik} = 2G \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial a \partial k} - \Delta\Phi \cdot \delta_{ik} \right), \quad (18)$$

где δ_{ik} подчиняется условиям: $\delta_{ik} = 0$ при $i \neq k$ ($i, k = x, y, z$); $\delta_{ik} = 1$ при $i = k$.

В седьмом слагаемом формулы (9), учитывая теплоперенос диффундирующим материалом, коэффициент диффузии рассчитывается:

$$K_{diff} = a_d d_s^2 V_0 \exp(-U/(kT)), \quad (19)$$

где a_d – множитель порядка 0,1, определяемый типом кристаллической решетки; d_s – расстояние между ближайшими эквивалентными положениями вакансий в кристалле; V_0 – величина порядка частоты атомных колебаний в кристалле ($10^{12} \dots 10^{14}$ с⁻¹); U – потенциальный барьер, который необходимо преодолеть вакансии при смещении в соседнее положение; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

В восьмом слагаемом формулы (9) учитывается влияние химических процессов на баланс тепла в мишени.

В случае, когда лазерному облучению подвергается многокомпонентное вещество АВ (химическое соединение, сплав), в установившемся процессе отношение поверхностных концентраций будет таким:

$$\frac{n_A(0)}{n_B(0)} = \frac{n_{AV}}{n_{BV}} \left(\frac{M_A}{M_B} \right)^{1/4}, \quad (20)$$

где $n_{A,V}$ и $n_{B,V}$ – концентрации атомов А и В в объеме мишени.

Происходит обогащение приповерхностного слоя более тяжелым компонентом.

При высоких плотностях потока n_0 , достаточных для создания более толстого покрытия, чем монослой, скорость реакции определяется только режимом облучения и не зависит от n_0 и T :

$$dN_1/dt = N_0 \sigma_p J_e / e \text{ при } n_0 \tau_1 \gg N_0. \quad (21)$$

2.2. Теплообмен на поверхности детали

Тепловой поток на поверхности мишени создается за счет следующих факторов:

- столкновительных процессов: тепло, выделяемое на поверхности вследствие действия лазерного излучения (первое слагаемое справа), теплового потока, отводимого с термоэлектронами (второе слагаемое) и вторичными фотонами (третье слагаемое);

- теплофизических процессов: отвод теплового потока с испаренным материалом (четвертое слагаемое), ушедшим материалом в жидкой фазе, если создаются условия для его выброса (пятое слагаемое), тепловым излучением нагретой поверхности (шестое слагаемое) и конденсированными атомами, ранее испаренными (седьмое слагаемое);

- плазмохимических процессов, реализующихся с помощью реакций потока лазерного излучения с испаренным материалом детали или адсорбированными газами (восьмое слагаемое); эта энергия передается излучением.

Передача энергии осуществляется также путем излучения потока квантов лазерного излучения (последнее слагаемое):

$$\begin{aligned} -\lambda [T] \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} = & \\ = F_{\ell,r} - F_{m\dot{y}} - F_{\dot{y}\delta} - F_{\dot{e}\ddot{m}} - & \\ -F_m - \sigma \varepsilon \delta^4(0, y, z, t) \pm & \\ \pm F_{\dot{e}\dot{t}\dot{a}} + F_{\dot{i}\dot{o}} + \sigma \varepsilon_{\dot{n}} \dot{\delta}_c^4, & \end{aligned} \quad (22)$$

где σ – постоянная Стефана–Больцмана; ε и ε_c – степень черноты поверхности мишени и среды; T_c – температура среды.

Более подробно каждое слагаемое рассмотрено в работе [1].

2.3. Результаты расчетов и их обсуждение

Расчеты полей температур при действии потока лазерного излучения на деталь проводим на ЭВМ методом МКЭ.

В результате расчетов определяли температурные поля в зоне действия лазерного излучения на сталях в процессах нагрева и охлаждения. Расчеты проводили для широкого круга плотностей теплового потока и времени его действия, но вынесены на обсуждение только те, максимальные температуры которых во время нагрева и охлаждения близки к необходимому для получения наноструктур (500...1500 К), а скорости нарастания температуры превышают 10^7 К/с.

Так, на рис. 1 показаны зависимости максималь-

ной температуры в пятне ($r = 0,1$ мм) при действии тепловых потоков с пиковой плотностью $q = 3 \cdot 10^{10}$ Вт/м² (1), $q = 2,5 \cdot 10^{10}$ Вт/м² (2); $q = 2 \cdot 10^{10}$ Вт/м² (3); $q = 1,5 \cdot 10^{10}$ Вт/м² (4) и $q = 10^{10}$ Вт/м² (5) с временем действия 10^{-7} с на сталь 20 (рис. 1, а) и сталь 40X (рис. 1, б).

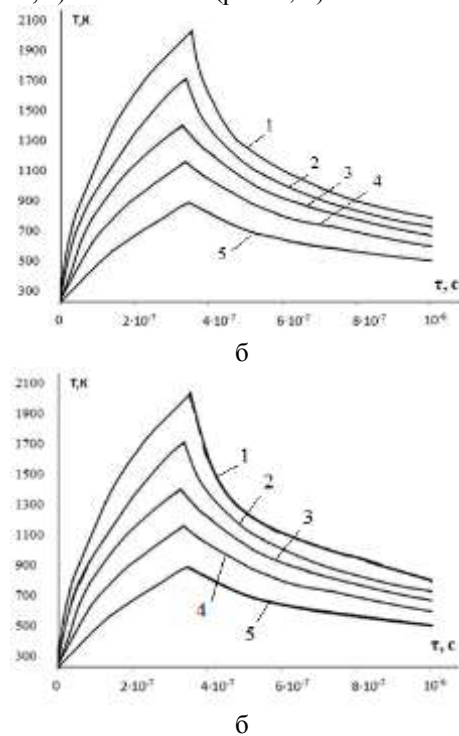


Рис. 1. – Распределение температур на глубине 1 мкм при действии лазерного излучения. Пиковая плотность теплового потока, действующего в начальный момент времени $3 \cdot 10^{-7}$ с, составляет $3 \cdot 10^{10}$ Вт/м² (1), $2,5 \cdot 10^{10}$ Вт/м² (2), $2 \cdot 10^{10}$ Вт/м² (3), $1,5 \cdot 10^{10}$ Вт/м² (4) и 10^{10} Вт/м² (5): а – на сталь 20; б – на сталь 40X

Видно, что для первых двух режимов максимальные температуры на стали 20 (рис. 1, а) превышают температуру 1500 К, но время, за которое они действуют ($2,1 \cdot 10^{-7}$ с для первого режима и $1,1 \cdot 10^{-7}$ с для второго) релаксация температурного поля не приведет к существенному увеличению первоначального размера зерна, так что не только в третьем, четвертом и пятом режимах следует ожидать получения наноструктур, но и в первом и втором. Для режимов нагрева и остывания скорость роста и спада температуры превышает 10^7 К, что подтверждает вероятность образования наноструктур.

Для стали 40X время, в которое температуры превышают 1500 К, для первого режима составляет $1,7 \cdot 10^{-7}$ и 10^{-7} с соответственно для второго режима, что еще меньше, чем для стали 20, и в этом случае влияние такой температуры на рост зерна менее существенно. Результаты аналогичных расчетов для стали 40 и 45 показаны на рис. 2.

В этом случае величины максимальных температур снижаются и составляют величины порядка 1900 К, тогда как они для стали 20 превышают 2000 К, характер изменения максимальной температуры во времени сохранился, скорость роста температуры и для этих материалов превышает 10^7 К/с. Это

свидетельствует о том, что для этих материалов есть реальная возможность получения наноструктур.

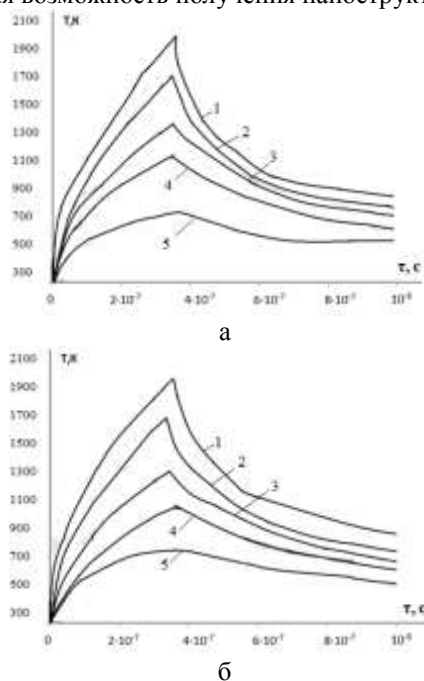


Рис. 2 – Температура на глубине 1 мкм при действии лазерного излучения. Пиковая плотность теплового потока, действующего в начальный момент времени $3 \cdot 10^{-7}$ с, составляет $3 \cdot 10^{10}$ Вт/м² (1), $2,5 \cdot 10^{10}$ Вт/м² (2), $2 \cdot 10^{10}$ Вт/м² (3), $1,5 \cdot 10^{10}$ Вт/м² (4) и 10^{10} Вт/м² (5): а – на сталь 40; б – на сталь 45

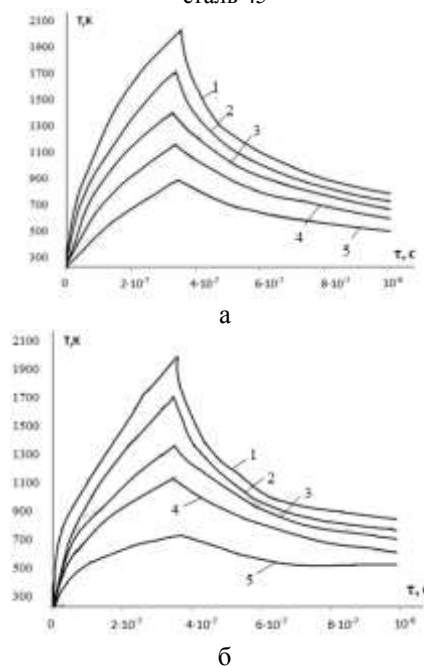


Рис. 3 – Температура на глубине 1 мкм при действии лазерного излучения. Пиковая плотность теплового потока, действующего в начальный момент времени $3 \cdot 10^{-7}$ с, составляет $3 \cdot 10^{10}$ Вт/м² (1), $2,5 \cdot 10^{10}$ Вт/м² (2), $2 \cdot 10^{10}$ Вт/м² (3), $1,5 \cdot 10^{10}$ Вт/м² (4) и 10^{10} Вт/м² (5): а – на стали У8; б – на стали У12

Для высокоуглеродистых сталей У8 и У12 при действии теплового потока $3 \cdot 10^{10}$ Вт/м² и $2,5 \cdot 10^{10}$ Вт/м² максимальные температуры превышают также 1500 К и приближаются к 2000 К, но время

действия таких температур не превышает $2 \cdot 10^7$ с. Для таких материалов при остальных режимах до времени действия 10^{-6} с температурный режим способствует образованию наноструктур, да и скорость нарастания температур превышает 10^7 К/с.

Это подтверждает, что и для таких материалов высока вероятность образования наноструктур.

Оценить размер зоны образования наноструктуры можно по радиусу зоны образования наноструктур. Для этого построена пространственно-временная картина распределения температур по радиусу и во времени для стали 40X при действии теплового потока с плотностью $3 \cdot 10^{10}$ Вт/м² при радиусе пятна 0,1 мм.

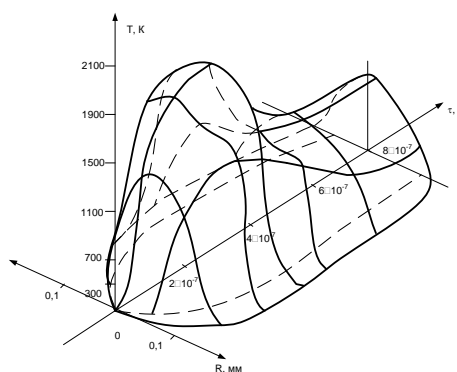


Рис. 4 – Пространственно-временная картина распределения температур по радиусу во времени при действии лазерного излучения на сталь 40X с плотностью теплового потока $3 \cdot 10^{10}$ Вт/м² при радиусе пятна 0,1 мм

Видно, что по радиусу температура снижается по сравнению с максимальной на 200...250 К, что свидетельствует о незначительном влиянии зоны, где температура превышает допустимую (1500 К), на характер роста зерна, который будет незначительным. Все это еще раз подтверждает возможность получения наноструктур в слое глубиной порядка микрометров и радиусом более 0,1 мм.

Практически те же или близкие температуры можно получить при плотностях теплового потока на два порядка меньше $q = 3 \cdot 10^8$ Вт/м² и времени его действия $3 \cdot 10^{-3}$ с (рис. 5), но в этом случае наноструктуры не образуются, а образуются микро- и субмикрочастицы размером 1...3 мкм и 0,5...0,8 мкм (см. работу [9]). Следовательно, для получения наноструктур необходимо наличие скоростей роста температуры более 10^7 К/с, а в этом случае максимальная скорость роста температуры достигает только $6 \cdot 10^6$ К/с и возможно образование только субмикроструктур.

Для выбора технологических параметров лазерного излучения при получении наноструктур на основе проведенных расчетов температур и скоростей их нарастания были построены зависимости критических плотностей тепловых потоков $q_{кр \max}$ и $q_{кр \min}$ от времени их действия, при которых образуются наноструктуры на стали 40X (рис. 6).

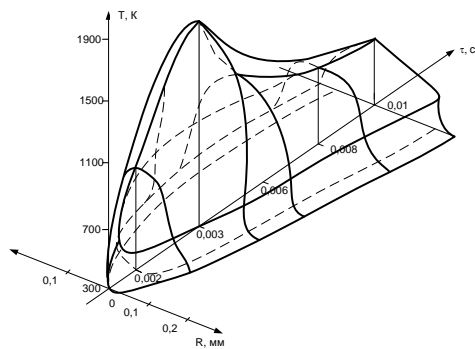


Рис. 5 – Пространственно-временная картина распределения температур по радиусу и во времени при действии лазерного излучения с плотностью теплового потока $3 \cdot 10^8$ Вт/м² при радиусе пятна 0,1 мм

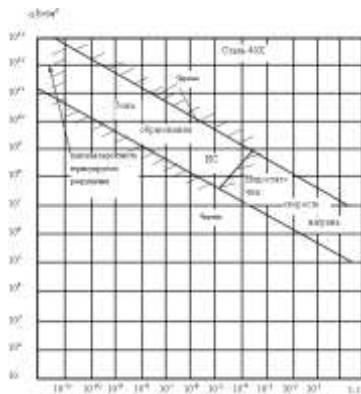


Рис. 6 – Зависимость критических значений плотностей тепловых потоков, обеспечивающих получение наноструктур от времени их действия

Видно, что зона технологических параметров, обеспечивающая получение наноструктур, ограничена прямыми $Q_{kp \max}$, $Q_{kp \min}$, зоной, где недостаточна скорость роста температуры и зоной, где высокая вероятность термоупругого разрушения. Показана возможность выбора технологических параметров лазерного излучения, плотности теплового потока и времени его действия, обеспечивающие получение наноструктур в поверхностном слое.

Выводы. Получены условия образования наноструктур в поверхностном слое сталей с различным содержанием углерода (стали 20, 40, 45, 40X, У8 и У12), которые определяют требуемые температуры (500...1500 К) и скорости их нарастания (более 10^7 К/с).

Определены зоны образования наноструктур в зависимости плотности теплового потока от времени действия ионизирующего излучения.

Костюк Геннадий Игоревич – д-р техн. наук, проф., проф. Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Kostyuk Gennadiy Igorevich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Aerospace University «KhAI», tel.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Павленко Виталий Николаевич – д-р техн. наук, Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06;

Pavlenko Vytalyi Nykolaevych – Doctor of Technical Sciences, National Aerospace University «KhAI», tel.: (057)-788-42-06;

Широкий Юрий Вячеславович – канд. техн. наук, доц., доц. Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06;

Shyrokyi Yuryi Viacheslavovych – Candidate of Technical Sciences, Docent, National Aerospace University «KhAI», tel.: (057)-788-42-06.

Показано, что необходимо учитывать скорость нарастания температуры и вероятность термоупругого разрушения под действием температурных напряжений. Так, при недостаточных скоростях нарастания температуры образуются микро- и субмикроструктуры, что подтверждено экспериментально.

Список литературы: 1. Костюк, Г.И. Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы [Текст]: моногр. / Г.И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 648 с. 2. Костюк, Г. И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст]: в 2 кн. / Г. И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. – 1030 с. 3. Костюк, Г.И. Наноструктуры и нанопокртия: перспективы и реальность [Текст]: учеб. пособие / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с. 4. Костюк, Г.И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем [Текст]: моногр.-справ. / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 633 с. 5. Костюк, Г.И. Эффективные покрытия и модифицированные упрочненные слои на режущих инструментах [Текст]: моногр.-справ./ Г.И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академ. наук и иннов. техн., 2012. – 728 с. 6. Свойства элементов / под ред. Г.В. Самсонова. – М.: Metallurgiya, 1976. – Ч. 1. Физические свойства. – 598 с. 7. Дешман, С. Научные основы вакуумной техники / М.: Мир, 1961. – 675 с. 8. Френкель, Я.И. Собр. тр. в 9 т. – Кинетическая теория жидкости: т. 3. – М.Л., АН СССР, 1959. – 422 с. 9. Антропов, И.И. Взаимодействие лазерного излучения с поверхностью металлов, имеющих поликристаллическое строение // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Вып. 26 – Алчевск: ДонГТУ, 2008. – С. 353–363.

Bibliography (transliterated): 1. Kostyuk, G.I. Nanotekhnologii: teoriya, eksperiment, tekhnika, Perspektivy [Tekst]: monogr. / G.I. Kostyuk. - Kiev: Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovatP. tekhnologiy, 2012. - 648 P. 2. Kostyuk, G. I. Fiziko-tekhnicheskiye osnovy naneseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy [Tekst]: v 2 kn. / G. I. Kostyuk. - Kiev: Izd-vo AINU, 2002. - 1030 P. 3. Kostyuk, G.I. Nanostrukury i nanopokrytiya: perspektivy i real'nost' [Tekst]: ucheb. posobiye / G.I. Kostyuk. - Kharkov.: NatP. aerokosm. un-t «Khar'k. aviatP. in-t», 2009. - 406 P. 4. Kostyuk, G.I. Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem [Tekst]: sprav monogr.- / G.I. Kostyuk. - Kharkov.: NatP. aerokosm. un-t «Khar'k. aviatP. in-t», 2007. - 633 P. 5. Kostyuk, G.I. Effektivnyye pokrytiya i modifitsirovannyye uprochnennyye slои na rezhushchikh instrumentakh [Tekst]: Monogr.-sprav / G.I. Kostyuk. - Kiev: Izd. tsentr Mezhdunar. akadem. nauk i innov. . tekhn, 2012. - 728 P. 6. Svoystva elementov / pod red. G.V. Samsonova. - Moscow: Metallurgiya, 1976. - CH. 1. Fizicheskiye svoystva. - 598 P. 7. Dushman, P. Nauchnyye osnovy vakuumnoy tekhniki / Moscow: Mir, 1961. - 675 P. 8. Frenkel', YA.I. Sobr. tr. v 9 t. - Kineticheskaya teoriya zhidkosti: t. 3. - M.L., AN SSSR, 1959. - 422 P. 9. Antropov, I.I. Vzaimodeystviye lazernogo izlucheniya s poverkhnost'yu metallov, imeyushchikh polikristallicheskoye stroeniye // Sbornik nauchnykh trudov Donbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. - No. 26 - Alchevsk: DonGTU, 2008. - P. 353-363.

Поступила (received) 07.10.2015

УДК 621.923

О. С. КЛЕНОВ**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛООВОГО ПРОЦЕССА ПРИ ШЛИФОВАНИИ**

Получены аналитические зависимости для определения температуры резания, глубины проникновения тепла в адиабатический стержень и времени нагрева адиабатических стержней, множеством которых представлен снимаемый припуск при плоском шлифовании. Установлено, что во времени температура резания увеличивается, асимптотически приближаясь к постоянному значению. Глубина проникновения тепла в адиабатический стержень и время нагрева адиабатического стержня также изменяются по закону изменения температуры резания.

Ключевые слова: процесс шлифования, многопроходное шлифование, температура резания, тепловой процесс, адиабатический стержень, глубина шлифования.

Введение. При шлифовании изделий из закаленных сталей и твердых сплавов постоянно возникают проблемы, связанные с появлением на обрабатываемых поверхностях прижогов, микротрещин и других дефектов температурного происхождения. Естественно, это снижает эффективность обработки, приводит к браку обрабатываемых изделий и требует изыскания новых путей исключения этих дефектов, т.к. традиционные методы шлифования не обеспечивают решения данной проблемы без снижения производительности обработки, что малоэффективно. В связи с этим возникает необходимость теоретического анализа закономерностей формирования параметров теплового процесса при шлифовании на основе разработки новых подходов и, в первую очередь, к определению температуры резания при шлифовании.

Анализ последних достижений и литературы. Традиционно вопросы теоретического определения температуры резания при шлифовании решаются на основе использования классического уравнения теплопроводности [1-4]. Однако полученные решения обладают существенным недостатком, связанным с неопределенностью глубины проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, поскольку граничным условием предусмотрено нулевое значение температуры поверхностного слоя обрабатываемой детали на бесконечном удалении от точки действия теплового источника. Все это ограничивает возможности точного определения температуры резания при шлифовании и требует уточненного решения, полученного, например, на основе упрощенного подхода, предложенного в работе [5]. Его суть состоит в том, что, представляя снимаемый припуск в виде множества бесконечно тонких адиабатических стержней, рассматривается формирование температуры в зоне шлифования с учетом движения теплового источника вдоль адиабатического стержня со скоростью, определяемой параметрами режима шлифования. Такой подход позволяет установить глубину проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, при которой температура принимает нулевое значение. Поэтому в работе решаются вопросы развития этого теоретического подхода.

Цель работы, постановка проблемы. Целью работы является теоретическое обоснование условий снижения температуры резания при шлифовании на

основе применения нового теоретического подхода к ее определению. Для этого необходимо сравнить значения температуры резания при многопроходном и глубинном шлифовании и обосновать условия выбора оптимальных параметров шлифования с учетом ограничения по температуре резания.

Материалы исследований. Для достижения поставленной цели рассмотрена расчетная схема шлифования (рис. 1) [5], в которой снимаемый припуск представлен в виде множества бесконечно тонких адиабатических стержней, которые перерезаются шлифовальным кругом. В результате тепловой источник движется вдоль адиабатического стержня с постоянной скоростью $V_{рез}$.

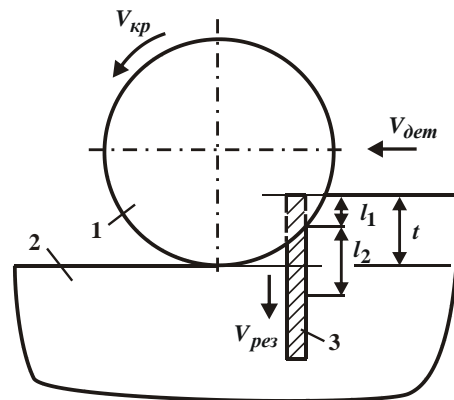


Рис. 1 – Расчетная схема параметров теплового процесса при плоском шлифовании: 1 – круг; 2 – деталь; 3 – адиабатический стержень.

Глубина проникновения тепла в адиабатический стержень после условного n -го бесконечно малого контакта круга со стержнем (длительностью $d\tau$) определяется из условия: $l_{2n} = l_{2n-1} + V_{рез} \cdot d\tau$, где

$$l_{2n} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \tau_n}; \quad l_{2n-1} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot (d\tau + \tau_{n-1})} \quad - \text{глубина}$$

проникновения тепла в адиабатический стержень после условного $(n-1)$ -го бесконечно малого контакта круга с обрабатываемым материалом, м; τ_n, τ_{n-1} – время нагрева адиабатического стержня после n -го и $(n-1)$ -го бесконечно малых контактов круга с обрабатываемым материалом, с; λ – коэффициент тепло-

© О. С. Кленов, 2015

проводности материала обрабатываемой детали, Вт/м·К; c – удельная теплоемкость материала обрабатываемой детали, Дж/(кг·К); ρ – плотность материала обрабатываемой детали, кг/м³.

После преобразований получено:

$$\sqrt{(d\tau + \tau_{n-1})} - \sqrt{\tau_n} = V_{рез} \cdot \sqrt{\frac{c \cdot \rho}{2 \cdot \lambda}} \cdot d\tau. \quad (1)$$

После умножения и деления левой части уравнения (1) на сопряженную величину $\sqrt{(d\tau + \tau_{n-1})} + \sqrt{\tau_n}$, имеем:

$$\frac{d\tau + \tau_{n-1} - \tau_n}{(\sqrt{d\tau + \tau_{n-1}} + \sqrt{\tau_n})} = V_{рез} \cdot \sqrt{\frac{c \cdot \rho}{2 \cdot \lambda}} \cdot d\tau. \quad (2)$$

С учетом $\tau_n - \tau_{n-1} = d\tau_n$ и $d\tau + \tau_{n-1} \approx \tau_n$ условие (2) принимает вид:

$$d\tau - d\tau_n = V_{рез} \cdot \sqrt{\frac{c \cdot \rho}{2 \cdot \lambda}} \cdot 2 \cdot \sqrt{\tau_n} \cdot d\tau. \quad (3)$$

В результате получено интегральное уравнение:

$$d\tau = \frac{d\tau_n}{\left(1 - 2 \cdot V_{рез} \cdot \sqrt{\frac{c \cdot \rho}{2 \cdot \lambda}} \cdot \tau_n\right)}. \quad (4)$$

Решая интегральное уравнение (4) с учетом начального условия $\tau_n(\tau=0) = 0$, имеем

$$\sqrt{\tau_n} = \frac{1}{m} \cdot \left(1 - e^{-\frac{m^2}{2} \tau - m \cdot \sqrt{\tau_n}}\right), \quad (5)$$

где $m = 2 \cdot V_{рез} \cdot \sqrt{\frac{c \cdot \rho}{2 \cdot \lambda}}$;

τ – время контакта круга с адиабатическим стержнем, с.

Как видно, зависимость (5), по сути, является уравнением относительно неизвестной величины τ_n , которая входит в его левую и правую части. Очевидно, установить взаимосвязь между параметрами τ_n и τ можно численными расчетами для вполне конкретных условий обработки. Таким образом показано, что параметры τ_n и τ количественно отличаются, для них справедливо соотношение $\tau_n < \tau$. Это указывает на то, что формирование температуры резания в условиях движения теплового источника вдоль адиабатического стержня подчиняется иным закономерностям в сравнении со случаем действия на адиабатический стержень неподвижного теплового источника. В этом случае $\tau_n = \tau$, т.е. все тепло, образующееся в процессе шлифования, уходит на нагревание адиабатического стержня. В случае же действия на адиабатический стержень движущегося теплового источника основная часть тепла уходит в образующиеся стружки и лишь небольшая часть тепла, определяемая временем

$\tau_n < \tau$, уходит на нагревание адиабатического стержня, т.е. на нагревание поверхностного слоя обрабатываемой детали. Поэтому температура резания будет меньше, чем в случае действия на адиабатический стержень движущегося теплового источника.

Температура резания при шлифовании определяется зависимостью [5]: $\theta = \frac{q \cdot l_{2n}}{\lambda}$, где $q = \sigma \cdot V_{рез}$ – плотность теплового потока, Вт/м²; σ – условное напряжение резания, Н/м². Откуда $l_{2n} = \frac{\lambda \cdot \theta}{\sigma \cdot V_{рез}}$. Соответственно

$$\sqrt{\tau_n} = \sqrt{\frac{c \cdot \rho}{2 \cdot \lambda}} \cdot \frac{\lambda \cdot \theta}{\sigma \cdot V_{рез}}. \quad (6)$$

Подставляя зависимость (6) в (5) и потенцируя ее, получено:

$$\tau = -\frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot V_{рез}^2} \cdot \left[\ln \left(1 - \frac{c \cdot \rho}{\sigma} \cdot \theta \right) + \frac{c \cdot \rho}{\sigma} \cdot \theta \right]. \quad (7)$$

Очевидно, при условии $\theta \rightarrow \frac{\sigma}{c \cdot \rho}$ функция $\ln \left(1 - \frac{c \cdot \rho}{\sigma} \cdot \theta \right) = \ln 0 \rightarrow -\infty$. Тогда время $\tau \rightarrow \infty$ и температура резания принимает максимальное значение:

$\theta_{max} = \frac{\sigma}{c \cdot \rho}$. Как видно, максимальная температура

резания при шлифовании зависит от одной переменной величины – условного напряжения резания σ : чем оно меньше, тем меньше θ_{max} . Следовательно, основным путем уменьшения температуры резания при шлифовании необходимо рассматривать уменьшение условного напряжения резания σ за счет снижения силовой напряженности процесса шлифования. Это достигается в результате уменьшения интенсивности трения в зоне резания путем обеспечения работы шлифовального круга в режиме самозатачивания или применяя эффективные методы его непрерывной или периодической правки.

Зависимость (7) может быть представлена:

$$\tau = -\frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot V_{рез}^2} \cdot \left[\ln \left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}} \right) + \frac{\theta}{\theta_{max}} \right]. \quad (8)$$

Для анализа полученных аналитических зависимостей рассмотрим процесс плоского шлифования образца из закаленной стали ШХ15 ($\lambda = 42$

Вт/(м·градус); $a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} = 8,4 \cdot 10^{-6}$ м²/с – коэффициент

температуропроводности) абразивным кругом с радиусом $R_{кр} = 0,2$ м, глубиной шлифования $t = 0,01 \cdot 10^{-3}$ м и удельной производительностью обработки $Q_{уд} = 400$ мм²/мин. Скорость перемещения теплового источника вдоль адиабатического стержня равна (рис. 1):

$$V_{рез} = \frac{Q_{y\delta}}{\sqrt{2t \cdot R_{сп}}} = 3,33 \text{ мм/с. Условное напряжение ре-}$$

зания определяется зависимостью [3]: $\sigma = \frac{2\sigma_{сжс}}{K_{рез}}$, где

$\sigma_{сжс}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала (для стали ШХ15: $\sigma_{сжс} = 2000 \text{ Н/мм}^2$); $K_{рез} = 0,4$ – коэффициент резания при шлифовании. Тогда $\sigma = 10000 \text{ Н/мм}^2 = 10^{10} \text{ Н/м}^2$; $c \cdot \rho = \frac{\lambda}{a} = 5 \cdot 10^6$

Дж/(м³·град); $\frac{c \cdot \rho}{\sigma} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ град}^{-1}$. Подставляя эти данные в зависимость (7), получено:

$$\tau = -0,757 \cdot \left[\ln(1 - 5 \cdot 10^{-4} \cdot \theta) + 5 \cdot 10^{-4} \cdot \theta \right]. \quad (9)$$

При температуре резания $\theta = 2000 \text{ }^\circ\text{C}$ функция $\ln(1 - 5 \cdot 10^{-4} \cdot \theta) = \ln 0 \rightarrow -\infty$ и соответственно $\tau \rightarrow \infty$. Тогда максимальная температура резания при шлифовании равна $\theta_{max} = 2000 \text{ }^\circ\text{C}$.

С увеличением глубины шлифования до значения $t = 1 \text{ мм}$, т.е. с переходом в область глубинного шлифования, скорость перерезания шлифовальным кругом адиабатического стержня равна:

$$V_{рез} = \frac{Q_{y\delta}}{\sqrt{2t \cdot R_{сп}}} = 0,33 \text{ мм/с. Соответственно, зависи-}$$

мость (9) принимает вид:

$$\tau = -77,135 \cdot \left[\ln(1 - 5 \cdot 10^{-4} \cdot \theta) + 5 \cdot 10^{-4} \cdot \theta \right]. \quad (10)$$

Следовательно, и в этом случае $\theta_{max} = 2000 \text{ }^\circ\text{C}$. На рис. 2 и в табл. 1 приведены расчетные значения времени τ для случаев: $t = 0,01 \text{ мм}$ и $t = 1 \text{ мм}$.

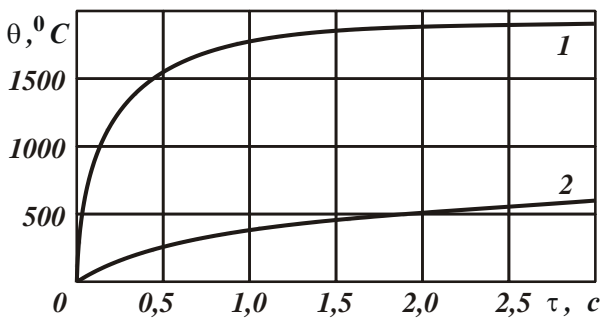


Рис. 2 – Зависимость θ от τ :
1; 2 – расчеты по зависимостям (7) и (8).

Для определения конкретных значений температуры резания θ для этих случаев ($t = 0,01 \text{ мм}$ и $t = 1 \text{ мм}$) необходимо знать время $\tau = t/V_{рез}$. В первом случае $\tau_1 = 0,01 \text{ мм}/3,33 \text{ мм/с} = 0,003 \text{ с}$; во втором – $\tau_2 = 1 \text{ мм}/0,33 \text{ мм/с} = 3 \text{ с}$. Как видно, во втором случае температура резания θ больше, чем в первом, т.е. глубинное шлифование осуществляется с большей температурой резания, чем многопроходное шлифование. Сделанный вывод также вытекает из зависимости (7),

рассматривая в ней время $\tau = t/V_{рез}$. После преобразований имеем:

$$Q_{y\delta} \cdot \sqrt{\frac{t}{2 \cdot R_{сп}}} = -\frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \left[\ln\left(1 - \frac{c \cdot \rho}{\sigma} \cdot \theta\right) + \frac{c \cdot \rho}{\sigma} \cdot \theta \right]. \quad (11)$$

Расчетные значения безразмерной функции $f = \left[\ln\left(1 - \frac{c \cdot \rho}{\sigma} \cdot \theta\right) + \frac{c \cdot \rho}{\sigma} \cdot \theta \right]$, которая входит в зависимость (11), приведены в табл. 2.

Как видно, с увеличением безразмерной функции f температура резания θ увеличивается. Следовательно, увеличение глубины шлифования t и удельной производительности обработки $Q_{y\delta}$ в зависимости (11) приводит к увеличению температуры резания θ . При этом $Q_{y\delta}$ в большей мере влияет на температуру резания θ , чем глубина шлифования t , поскольку входит в зависимость (11) с большей степенью. Из этого вытекает, что добиться уменьшения температуры резания θ при шлифовании для заданного значения $Q_{y\delta}$ можно уменьшением глубины шлифования t , т.е. применением многопроходного шлифования.

В табл. 3 приведены расчетные значения параметра $l_{2n} = \frac{\lambda \cdot \theta}{\sigma \cdot V_{рез}}$ и времени τ_n , определяемого зависимостью (6). Как видно, параметры l_{2n} и τ_n тем больше, чем больше температура резания θ и глубина шлифования t . Из табл. 1 и табл. 3 следует, что всегда выполняется условие $\tau > \tau_n$.

В общем случае количество тепла, образующееся при шлифовании, равно $Q = N \cdot \tau$, где $N = q \cdot F$ – мощность шлифования, Вт; $q = \sigma \cdot V_{рез}$ – плотность теплового потока, Вт/м²; F – площадь поперечного сечения адиабатического стержня, м². Тогда количество тепла, уходящего в адиабатический стержень, равно: $Q_{стерж} = N \cdot \tau_n$, а количество тепла, уходящего в образующиеся стружки – $Q_{струж} = N \cdot (\tau - \tau_n)$.

В табл. 4 приведены расчетные значения времени $(\tau - \tau_n)$, отношений $(\tau - \tau_n)/\tau$, τ_n/τ и $(\tau - \tau_n)/\tau_n$, полученных на основе значений τ и τ_n , взятых из табл. 1 и табл. 3 для случая $t = 0,01 \text{ мм}$.

Как видно, значения времени $(\tau - \tau_n)$ и τ_n (табл. 3), определяющие соответственно количество тепла, уходящего в образующиеся стружки и адиабатический стержень, увеличиваются с увеличением температуры резания θ . При этом доля тепла, уходящего в образующиеся стружки и определяемая отношением $(\tau - \tau_n)/\tau$, увеличивается с увеличением температуры резания θ , а доля тепла, уходящего в адиабатический стержень и определяемая отношением τ_n/τ , наоборот, уменьшается.

Отношение значений количества тепла, уходящего в образующиеся стружки и адиабатический стержень,

$(\tau - \tau_n)/\tau_n$ увеличивается с увеличением температуры резания θ . Это свидетельствует о том, что с увеличением θ до 1500 °С в адиабатический стержень уходит

больше тепла, чем в образующиеся стружки, а с увеличением θ от 1500 до 2000 °С, наоборот, больше тепла уходит в образующиеся стружки.

Таблица 1 – Расчетные значения времени τ (в секундах)

$\theta, ^\circ\text{C}$	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000
τ по зависимости (7)	0	0,004	0,022	0,072	0,15	0,27	0,464	0,85	∞
τ по зависимости (8)	0	0,407	2,242	7,336	15,28	27,51	47,28	86,61	∞

Таблица 2 – Расчетные значения безразмерной функции f

$\theta, ^\circ\text{C}$	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000
$-f$	0	0,0053	0,029	0,095	0,198	0,357	0,613	1,129	∞

Таблица 3 – Расчетные значения параметров l_{2n} и τ_n

$\theta, ^\circ\text{C}$	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000
$l_{2n}, \text{мм} (t=0,01 \text{ мм})$	0	0,315	0,63	0,95	1,33	1,58	1,89	2,2	2,52
$l_{2n}, \text{мм} (t=1 \text{ мм})$	0	3,18	6,36	9,54	12,7	15,9	19,1	22,3	25,4
$\tau_n, \text{с} (t=0,01 \text{ мм})$	0	0,004	0,02	0,053	0,105	0,148	0,213	0,29	0,378
$\tau_n, \text{с} (t=1 \text{ мм})$	0	0,6	2,4	5,42	9,63	15,1	21,67	29,49	38,52

Таблица 4 – Расчетные значения $(\tau - \tau_n)$, $(\tau - \tau_n)/\tau$, τ_n/τ и $(\tau - \tau_n)/\tau_n$

$\theta, ^\circ\text{C}$	500	750	1000	1250	1500	1750	2000
$(\tau - \tau_n), \text{с}$	0,002	0,019	0,045	0,122	0,251	0,56	∞
$(\tau - \tau_n)/\tau$	0,091	0,264	0,3	0,452	0,541	0,659	∞
τ_n/τ	0,909	0,736	0,7	0,548	0,459	0,341	0
$(\tau - \tau_n)/\tau_n$	0,1	0,359	0,429	0,825	1,179	1,933	∞

Выводы. Получены аналитические зависимости для определения температуры резания, глубины проникновения тепла в адиабатический стержень и времени нагрева адиабатических стержней, множеством которых представлен снимаемый припуск при плоском шлифовании. Произведен численный расчет этих параметров и установлено, что с течением времени они непрерывно увеличиваются, асимптотически приближаясь к определенным постоянным значениям.

Список литературы: 1. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с. 2. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с. 3. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 4. "Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов" – Одесса: ОНПУ, 2002. – 802 с. 4. Силин С.С. Метод подобия при резании материалов / С.С. Силин.

– М.: Машиностроение, 1979. – 152 с. 5. Новиков Ф.В. Повышение эффективности технологии финишной обработки деталей пар трения поршневых насосов / Ф.В. Новиков, С.М. Яценко // Физические и компьютерные технологии: междунауч. научн.-техн. конф., 19-20 апреля 2007 г.: труды – Харьков: ХНПК "ФЭД", 2007. – С. 8-20.

Bibliography (transliterated): 1. Yakimov A.V. Optimizatsiya protsessa shlifovaniya / A.V. Yakimov. – Moscow: Mashinostroenie, 1975. – 175 P. 2. Reznikov A.N. Teplofizika protsessov mekhanicheskoy obrabotki materialov / A.N. Reznikov. – Moscow: Mashinostroenie, 1981. – 279 P. 3. Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologiy mashinostroeniya / pod obsh. red. F.V. Novikova i A.V. Yakimova. V 10 tomakh. – Vol. 4. "Teoriya abrazivnoy i almazno-abrazivnoy obrabotki materialov". – Odessa: ONPU, 2002. – 802 P. 4. Silin P.P. Metod podobiya pri rezanii materialov / P.P. Silin. – Moscow: Mashinostroenie, 1979. – 152 P. 5. Novikov F.V. Povyshenie effektivnosti tekhnologii finishnoy obrabotki detaley par treniya porshnevnykh nasosov / F.V. Novikov, P.M. Yatsenko // Fizicheskie i kompiuternye tekhnologii: mezhdun. nauchn.-tekhn. konf., 19-20 aprelya 2007 g.: trudy – Kharkov: KhNPK "FED", 2007. – P. 8-20.

Поступила (received) 11.11.2015

Кленов Олег Станиславович – кандидат технических наук, Фирма "ДиМерус Инженеринг" ООО, Харьков; тел.: (057) 7578777; e-mail: anna@dimeruP.com

Klenov Oleg Stanislavovith – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Firm "DiMerus Engineering" Ltd, Kharkiv; тел.: (057) 7578777; e-mail: anna@dimeruP.com

УДК 621.923

Ф. В. НОВИКОВ, Р. М. МИНЧЕВ**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ И ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ОТВЕРСТИЯ**

Обоснованы условия уменьшения шероховатости поверхности обрабатываемого отверстия за счет применения схемы внутреннего шлифования с расположением оси вращения круга перпендикулярно оси вращения обрабатываемого отверстия. Раскрыты закономерности образования погрешностей обработки отверстий при внутреннем шлифовании и хонинговании. Обоснована возможность повышения точности обработки за счет создания упругой системы в конструкции хона, а также показана эффективность применения гибкого круга при внутреннем шлифовании.

Ключевые слова: обрабатываемое отверстие, абразивная обработка, внутреннее шлифование, хонингование, хон, режимы шлифования, погрешности обработки, шероховатость поверхности.

Введение. Финишная обработка отверстий требует обеспечения параметров точности и шероховатости обработанных поверхностей на основе применения различных методов абразивной обработки, включая внутреннее шлифование, хонингование, обработку свободным абразивом. Однако эти методы достаточно трудоемки и не всегда обеспечивают выполнение требуемых условий обработки. Поэтому актуальной задачей является обоснование технологических возможностей обработки инструментами со связанным свободным абразивом и выбор наиболее эффективных направлений повышения точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей. Решение данной задачи имеет большое теоретическое и практическое значение, например для совершенствования технологии финишной абразивной обработки отверстий в гидро- и пневмоцилиндрах, где требуется обеспечить высокие показатели точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей.

Анализ последних достижений и литературы.

Вопросам высокоточной и высококачественной обработки отверстий в научно-технической литературе уделено большое внимание [1, 2], разработаны научные основы финишной абразивной обработки отверстий. Показано, что при обработке материалов с повышенными физико-механическими свойствами эффективно использовать алмазно-абразивные инструменты, обеспечивающие тончайшие срезы, наименьшую шероховатость поверхности, наименьшую силовую напряженность процесса резания, что приводит к повышению точности обработки [3]. В работе [4] получены аналитические зависимости для определения погрешностей лезвийной и абразивной обработки отверстий, что позволило выявить новые условия повышения точности обработки. Поэтому, используя их, можно решить ряд важных вопросов, связанных с выбором наиболее предпочтительных вариантов финишной абразивной обработки отверстий.

Цель работы, постановка проблемы. Целью работы является повышение показателей точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей отверстий на операциях внутреннего шлифования и хонингования за счет научно обоснованного выбора оптимальных условий обработки.

Материалы исследований. Наибольшее количество зерен, участвующих в процессе резания, имеет место при внутреннем шлифовании кругом с диаметром, равным диаметру обрабатываемого отверстия.

Поэтому и шероховатость поверхности будет наименьшей в этом случае. Однако это возможно при обработке точного отверстия. В противном случае, например при обработке отверстия со значительной нецилиндричностью, в начальный период произойдет деформация системы шлифовального круга, а затем при последующих выхаживающих проходах она будет восстанавливать свою прямолинейную форму. Это приведет к увеличению диаметра отверстия в поперечном сечении (где была наибольшая нецилиндричность) и образованию погрешности обработки отверстия в виде некруглости. Чтобы исключить это явление, необходимо обработку производить за несколько проходов кругами разного диаметра, увеличивая с каждым последующимходом диаметр круга. Однако реализовать на практике такую схему внутреннего шлифования довольно сложно и малоэффективно. Наиболее просто реализовать данную схему обработки можно при хонинговании, где имеется возможность непрерывного увеличения диаметра хона в процессе обработки с каждым егоходом за счет создания упругой системы в конструкции хона. Это позволит исключить образование погрешности обработки отверстия.

В работе [4] показано, что некруглость отверстия сложно устранить и в процессе рассверливания, используя лишь одно сверло. Необходимо с каждым последующимходом использовать сверла большего диаметра, что позволит в определенной степени устранить некруглость отверстия.

Применение обычной схемы внутреннего врезного или продольного шлифования, как показывает практика, также обеспечивает устранение погрешности обработки отверстия в виде некруглости и нецилиндричности. Однако, при этом существенно уменьшается длина дуги контакта круга с обрабатываемым отверстием и количество одновременно работающих зерен круга, что не позволяет добиться значительного уменьшения шероховатости поверхности. В связи с этим целесообразно использовать схему внутреннего шлифования, согласно которой ось вращения круга расположена перпендикулярно оси вращения обрабатываемой детали, а форма рабочей поверхности круга приобретает форму окружности обрабатываемого отверстия. В результате существенно увеличивается длина дуги контакта круга с обрабатываемым отверстием и соответственно количество од-

новременно работающих зерен круга, что является важным фактором уменьшения шероховатости поверхности. Используя данную схему внутреннего шлифования, кругом можно охватить до половины длины окружности обрабатываемого отверстия, что фактически реализует эффект шлифования кругом с диаметром, равным диаметру обрабатываемого отверстия. Отличие в количестве одновременно работающих зерен круга будет приблизительно в 2 раза, тогда как при обычном внутреннем шлифовании кругом с диаметром, например в 2 раза меньшим диаметра обрабатываемого отверстия, это отличие во много раз больше.

Для оценки влияния диаметра шлифовального круга на длину его контакта с обрабатываемым отверстием рассмотрена схема внутреннего шлифования (рис. 1), согласно которой длина дуги контакта круга с обрабатываемой поверхностью l равна AA' и определяется из условия пересечения двух окружностей радиусом $(R_{\text{дем}} - t)$ и $R_{\text{кр}}$:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = (R_{\text{дем}} - t)^2; \\ [x - (R_{\text{дем}} - R_{\text{кр}})]^2 + y^2 = R_{\text{кр}}^2, \end{cases} \quad (1)$$

где $R_{\text{дем}}$, $R_{\text{кр}}$ – радиусы обрабатываемого отверстия и шлифовального круга, м;
 t – глубина шлифования, м.

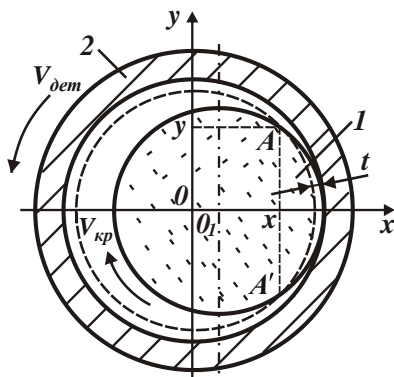


Рис. 1 – Расчетная схема параметров внутреннего шлифования: 1 – круг; 2 – обрабатываемая деталь.

Для определения координаты x точки A , в которой происходит пересечение рассматриваемых окружностей, необходимо взять разность первого и второго уравнений системы уравнений (1). Тогда

$$x = \frac{[(R_{\text{дем}} - t)^2 - R_{\text{кр}}^2]}{2 \cdot (R_{\text{дем}} - R_{\text{кр}})} + \frac{1}{2} \cdot (R_{\text{дем}} - R_{\text{кр}}). \quad (2)$$

Координата y точки A , где пересекаются рассматриваемые окружности, с учетом системы уравнений (1) и зависимости (2) определяется:

$$y = \sqrt{R_{\text{кр}}^2 - \left[\frac{(R_{\text{дем}} - t)^2 - R_{\text{кр}}^2}{2 \cdot (R_{\text{дем}} - R_{\text{кр}})} - \frac{1}{2} \cdot (R_{\text{дем}} - R_{\text{кр}}) \right]^2}. \quad (3)$$

Для удобства анализа зависимости (2) и (3) представим в виде: $x = a + b$; $y = \sqrt{R_{\text{кр}}^2 - (a - b)^2}$, где $a = \frac{[(R_{\text{дем}} - t)^2 - R_{\text{кр}}^2]}{2 \cdot (R_{\text{дем}} - R_{\text{кр}})}$; $b = \frac{1}{2} \cdot (R_{\text{дем}} - R_{\text{кр}})$. Тогда угол ψ , определяющий половину длины дуги контакта круга с обрабатываемой поверхностью, примет вид:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{y}{x} = \sqrt{\frac{R_{\text{кр}}^2}{(a + b)^2} - \frac{(a - b)^2}{(a + b)^2}}. \quad (4)$$

В табл. 1 приведены результаты численных расчетов функции $\operatorname{tg} \psi$, угла 2ψ в зависимости от радиуса круга $R_{\text{кр}}$ для исходных данных: $R_{\text{дем}} = 40$ мм и $t = 0,01$ мм, а также расчетные значения длины дуги контакта круга с обрабатываемой поверхностью $l = 2\pi \cdot R_{\text{дем}} \cdot \psi / 180^\circ$.

Таблица 1 – Расчетные значения $\operatorname{tg} \psi$, 2ψ и l

$R_{\text{кр}}$, мм	20	30	36	39
$\operatorname{tg} \psi$	0,0223	0,0365	0,068	0,1309
2ψ , град.	4	5	8	16
l , мм	1,395	1,744	2,791	5,582

Как видно, с увеличением $R_{\text{кр}}$ в пределах $0,5R_{\text{дем}} \leq R_{\text{кр}} < R_{\text{дем}}$ угол 2ψ и параметр l принимают значительно меньшие значения в сравнении с номинальными значениями 360° и $2\pi \cdot R_{\text{дем}}$. Поэтому в процессе внутреннего шлифования участвует весьма небольшое количество одновременно работающих зерен круга, что не позволяет добиться существенного уменьшения шероховатости поверхности, например, в сравнении с рассмотренной выше схемой внутреннего шлифования с осью вращения круга, расположенной перпендикулярно оси вращения детали.

При съеме неравномерных припусков в условиях внутреннего шлифования величина упругого перемещения y будет описываться такой же зависимостью, как и при растачивании отверстия [4]:

$$y = \frac{t_1}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{\text{pez}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi} \right)}, \quad (5)$$

а при хонинговании, вследствие того, что хон контактирует фактически со всей обрабатываемой поверхностью отверстия, такой же зависимостью, как и при рассверливании отверстия [4]:

$$y = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{\text{pez}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi} \right)}, \quad (6)$$

где t_1 – глубина резания при растачивании, м;

Δ – сдвиг оси сверла относительно оси исходного обрабатываемого отверстия, м;

c – жесткость технологической системы в радиальном направлении, Н/м;

$K_{рез} = P_{z1} / P_{y1} = P_{z2} / P_{y2}$ – коэффициент резания;

P_{z1} , P_{z2} , P_{y1} , P_{y2} – тангенциальные и радиальные составляющие силы резания, действующие на оба лезвия сверла, Н;

S – подача, м/об;

φ – половина главного угла сверла в плане.

Сравнивая зависимости (5) и (6), видно, что при внутреннем шлифовании величина упругого перемещения y будет больше, чем при хонинговании, т.к. числитель зависимости (6) меньше, а знаменатель больше. Следовательно, эффект от применения хонингования с точки зрения уменьшения погрешности обработки выше, чем от применения внутреннего шлифования. Однако, данное условие может выполняться не всегда, все зависит от того, можно ли увеличить диаметр хона с его каждым последующим проходом. Так, при рассверливании для этого необходимо увеличивать диаметры сверл с каждым их последующим проходом, тогда как при растачивании такой же эффект обработки достигается одним резцом, реализуя поперечную подачу. Такая же закономерность наблюдается и при внутреннем шлифовании и хонинговании, рассматривая вместо растачивания процесс внутреннего шлифования, а вместо рассверливания – процесс хонингования.

Добиться одновременно существенного повышения точности и производительности обработки отверстия, можно, применяя схему выхаживания, которая наиболее эффективно может быть реализована при шлифовании. Исходя из аналитической зависимости [4]:

$$y_n = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{рез}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^n}, \quad (7)$$

с увеличением количества проходов шлифовального круга n величина упругого перемещения y_n , возникающего в технологической системе, непрерывно уменьшается, где n – количество проходов инструмента. Входящий в зависимость (7) угол φ применительно к процессу шлифования необходимо рассматривать как угол наклона рабочей поверхности круга к обрабатываемой поверхности (рис. 2). Очевидно, при обычном многопроходном круглом шлифовании угол $\varphi \approx 0$ (рис. 2, а). При глубинном шлифовании угол φ определяет угол заборного конуса круга (рис. 2, б), который может изменяться в широких пределах. Необходимо отметить, что зависимость (7) справедлива для процесса шлифования абсолютно жестким кругом, например, абразивным или алмазным кругами на органических, керамических и металлических связках. При использовании на финишных операциях шлифовальных кругов на мягких связках (например, на вулканитовой связке), способных упруго деформироваться в процессе шлифования, расчетная зависимость (7) требует уточнения.

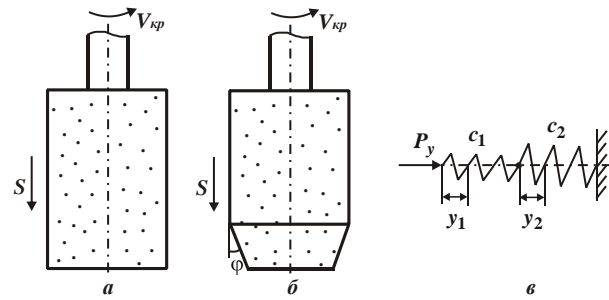


Рис. 2 – Расчетные схемы процесса внутреннего шлифования

В этом случае необходимо учитывать как изгибную жесткость шпинделя шлифовального станка, так и собственно контактную жесткость самого круга. Исходя из такого представления упругой системы станка, примем, что контактная жесткость круга равна c_1 , а изгибная жесткость шпинделя станка равна c_2 . На рис. 2, в круг и шпиндель станка представлены в виде пружин жесткостью соответственно c_1 и c_2 . Примем, что при шлифовании под действием радиальной составляющей силы резания P_y происходит сжатие пружины жесткостью c_1 на величину y_1 и сжатие пружины жесткостью c_2 на величину y_2 . Тогда

$$P_y = c_1 \cdot y_1 = c_2 \cdot y_2. \quad (8)$$

Величину y_2 можно представить: $y_2 = t_1 - y_1$, где t_1 – припуск при внутреннем шлифовании, м.

В случае несовпадения осей шпинделя станка и обрабатываемого отверстия параметр t_1 определяет величину максимального снимаемого припуска. Тогда уравнение (8) примет вид: $c_1 \cdot y_1 = c_2 \cdot (t_1 - y_1)$. Откуда $y_1 = t_1 / (1 + c_1 / c_2)$. Как следует из этой зависимости, при условии $c_1 \rightarrow \infty$ (т.е. при шлифовании абсолютно жестким кругом) величина $y_1 = 0$. При условии $c_2 \rightarrow \infty$ (т.е. при существенном увеличении изгибной жесткости шпинделя станка) величина $y_1 = t_1$. В этом случае величина упругого перемещения в технологической системе будет определяться лишь сжатием пружины жесткостью c_1 .

Разрешая зависимость $y_2 = t_1 - y_1$ относительно величины $y_1 = t_1 - y_2$ и подставляя ее в зависимость (8), получено: $y_2 = t_1 / (1 + c_2 / c_1)$. При контактной жесткости круга c_1 , соизмеримой с изгибной жесткостью шпинделя станка c_2 , величина упругого перемещения y_2 становится меньше. Следовательно, будет меньше погрешность обработки отверстия, т.е. применение менее жестких кругов позволяет повысить точность обработки отверстия.

Приведенное решение указывает, что уменьшая жесткость c_1 , можно добиться существенного уменьшения величины упругого перемещения y_2 . Именно этим фактом можно объяснить эффектив-

ность применения процесса хонингования отверстия, основанного на создании упругой системы (жесткостью c_1) сборного абразивного инструмента – хона. Очевидно, при съеме равномерного припуска (когда оси шпинделя станка и обрабатываемого отверстия совпадают) начальный натяг величиной t_1 в технологической системе будет определяться лишь сжатием пружины жесткостью c_1 . В этом случае жесткость пружины c_2 условно равна бесконечности ($c_2 \rightarrow \infty$). Исходя из этого, величина упругого перемещения y_n будет описываться зависимостью (7), рассматривая в ней вместо жесткости c_2 жесткость c_1 (для угла

$$\varphi = 0): y_n = \frac{t_1}{\left(1 + \frac{c_1 \cdot K_{pez}}{\sigma \cdot S}\right)^n}. \text{ Как видно, с увеличением}$$

жесткости c_1 величина y_n с течением времени обработки (т.е. с увеличением количества проходов инструмента n) будет уменьшаться интенсивнее, способствуя повышению производительности обработки.

При условии $c_2 > c_1$ такая же закономерность будет и при хонинговании отверстия с неравномерно снимаемым припуском, т.е. когда оси шпинделя станка и обрабатываемого отверстия не совпадают. За счет создания упругой системы жесткостью c_1 инструмента и возможности увеличения его диаметра в процессе обработки можно одновременно добиться требуемых значений величины y_n и диаметра обрабатываемого отверстия. Например, при рассверливании отверстия одновременно выполнить эти два условия невозможно, т.к. уменьшение величины $y_n \rightarrow 0$ за счет увеличения количества проходов инструмента n ведет к увеличению разбивки отверстия, т.е. к увеличению его диаметра. При хонинговании за счет искусственного создания упругой системы инструмента жесткостью c_1 , позволяющей увеличивать диаметр инструмента в процессе обработки, такая возможность существует. Для ее осуществления необходимо

выполнить условие $c_2 > c_1$, поскольку в противном случае продолжительность исправления погрешностей обрабатываемого отверстия, полученных на предыдущих операциях, увеличится.

Выводы. Обоснованы условия уменьшения шероховатости поверхности обрабатываемого отверстия за счет применения схемы внутреннего шлифования с расположением оси вращения круга перпендикулярно оси вращения обрабатываемого отверстия. Раскрыты закономерности образования погрешностей обработки отверстия при внутреннем шлифовании и хонинговании. Показаны значительные технологические возможности хонингования отверстия с точки зрения повышения точности обработки, достигаемые за счет создания упругой системы в конструкции абразивного инструмента – хона. Показана также эффективность применения гибкого шлифовального круга при внутреннем шлифовании.

Список литературы: 1. Технология машиностроения: учебник / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, П.А. Линчевский и др. – Одесса: ОНПУ, 2010. – 691 с. 2. Линчевский П.А. Обработка деталей на отделочно-расточных станках / П.А. Линчевский, Т.Г. Джугурян, А.А. Оргиян. – К.: Техника, 2001. – 300 с. 3. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке / Э.В. Рыжов, А.А. Сагарда, В.Б. Ильицкий и др. – К.: Наук. думка, 1979. – 244 с. 4. Брижан Т. М. Математическая модель определения закономерностей формирования погрешностей механической обработки отверстий / Т. М. Брижан // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. Серія: Технічні науки. – Маріуполь: ПДТУ, 2014. – Вип. 28. – С. 167-173.

Bibliography (transliterated): 1. Tekhnologiya mashinostroeniya: uchebnik / A.V. Yakimov, F.V. Novikov, P.A. Linthevskiy i dr. – Odessa: ONPU, 2010. – 691 p. 2. Linthevskiy P.A. Obrabotka detaley na otdelothno-rastochnykh stankakh / P.A. Linthevskiy, T.G. Dzhuguryan, A.A. Orgyan. – Kiev: Tekhnika, 2001. – 300 p. 3. Kachestvo poverkhnosti pri almazno-abrazivnoy obrabotke / E.V. Ryzhov, A.A. Sagarda, V.B. Iljitskiy i dr. – Kiev: Nauk. dumka, 1979. – 244 p. 4. Brizhan T.M. Matematicheskaya model opredeleniya zakonornostey formirovaniya pogreshnostey mekhanicheskoy obrabotki otverstiy / T. M. Brizhan // Visnik Priazovskogo derzhavnogo tekhnithnogo universitetu: zb. nauk. pratP. Seriya: Tekhnithni nauky. – Mariupol: PDTU, 2014. – Vol. 28. – PP. 167-173.

Поступила (received) 11.11.2015

Новиков Федор Васильевич – доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный экономический университет имени С. Кузнеця, и.о. заведующего кафедрой “Естественные науки и технологии”; тел.: (067) 6890342; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

Novikov Fedor Vasilyovith – Doktor of Technical Sciences (Ph. D.), Full Professor, Харьковский национальный экономический университет имени С. Кузнеця, и.о. заведующего кафедрой “Естественные науки и технологии”; тел.: (067) 6890342; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

Минчев Роман Александрович – ООО “Энергореле” (г. Мариуполь), инженер; тел. (067) 3905657; e-mail: tmbrizhan@ukr.net

Minthev Roman Aleksandrovith – Ltd. "Energorеле" (Mariupol), engineer; тел. (067) 3905657; e-mail: tmbrizhan@ukr.net

УДК 865/6

*Г.И. КОСТЮК, А.В. МАТВЕЕВ, Е.А. ВОЛЯК***О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ОБРАЗОВАНИЯ ЗЕРНА ПРИ ПОЛУЧЕНИИ НАНОСТРУКТУР В СЛУЧАЕ ДЕЙСТВИЯ ИОНОВ РАЗЛИЧНЫХ СОРТОВ, ЗАРЯДОВ И ЭНЕРГИЙ НА КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

В работе рассмотрена возможность оценки энергии, потребной на кристаллизацию, т.е. образование зерна при получении наноструктур в случае действия ионов различных сортов, энергий и зарядов. На основе квантово-механического подхода с учетом кулоновского отталкивания и ионной связи найдены энергии кристаллизации кластера. Число частиц в кластере рассчитано на основе решения совместной задачи теплопроводности и термоупругости. Показано, что, приняв энергию атомизации, равной энергии кристаллизации, для легких ионов – эта энергия близка к энергии действующих ионов, тогда как для тяжелых она незначительна и ее можно не учитывать.

Ключевые слова: энергия кристаллизации, наноструктуры, ионы, нанокластер.

Введение. В настоящее время есть достаточно много работ по экспериментальному изучению возможности получения наноструктур. Теоретических работ практически нет, за исключением работ [1, 2], но и они не позволяют учитывать энергию, затрачиваемую на образование нанозерна, которая в определенных условиях может быть значительной, что существенно снижает точность проводимых расчетов.

Приняв, что энергия образования зерна равна или несколько больше энергии атомизации зерна, ее можно рассчитать, используя методику работы [3]. Эта энергия может быть определена после первоначального нахождения числа частиц в нанокластере (НК) и определения, что частицы являются атомами или химическими соединениями. Тогда, определив долю атомов и химических соединений в зерне и зная энергию атомизации зерен каждого типа кластера (состоящего из атомов и химических соединений) и умножив на их количество, получим энергию, затрачиваемую на образование зерна, как сумму энергий образования кластера из атомов и химических соединений.

Работа выполнялась в рамках программы Министерства образования и науки Украины «Новые и ресурсосберегающие технологии в энергетике, промышленности и агропромышленном комплексе» (подсекция 13 «Аэрокосмическая техника и транспорт») и по темам: «Создание физико-технических основ повышения качества материалов аэрокосмических конструкций» и «Разработка технологических основ интегрированных технологий плазменно-ионной обработки деталей аэрокосмической техники» (подсекция 6 «Физико-технические проблемы материаловедения»), «Концепция создания наноструктур, нано- и традиционных покрытий с учетом влияния адгезии на эффективность и работоспособность деталей АТ, АД и РИ», «Экспериментально-теоретическое исследование получения наноструктур при действии ионных и свето-лучевых потоков на конструкционные материалы и РИ», хозяйственных работ и договоров о сотрудничестве.

Анализ последних исследований и литературы показал, что в настоящее время практически отсутствуют теоретические работы по определению размеров зерна и зон, где образуется нанозерно

[1–15]. Исключение составляют работы [1–2], но в них не учтена энергия кристаллизации. Все это говорит, что работа посвящена учету этого эффекта, она важна и актуальна.

Целью настоящих исследований было определить влияния энергии кристаллизации при действии ионов разных энергий, сортов и зарядов на процесс формирования наноструктур.

Постановка проблемы. Исследование выполняется в несколько этапов: проводится решение совместной задачи теплопроводности и термоупругости в зоне действия индивидуального иона соответствующей энергии, заряда и сорта, которая позволяет оценить на первом шаге возможное число частиц в НК, затем вычисляется энергия на атомизацию зерна из атомов и химических соединений. В дальнейшем с учетом этих энергий и количества атомов и химических соединений в зерне находим суммарную энергию атомизации зерна $E_{ат}$. Затем, приняв энергию образования зерна, как $E_z=1,1E_{ат}$, можем найти энергию, необходимую для образования зерна, с учетом которой определяем все характеристики в зоне действия иона: температуру, скорость нарастания температуры, температурные напряжения и скорость деформирования, размер зерна, объем нанокластера и глубины его залегания и истинное число частиц в НК.

Материалы исследований. В работе исследовалась энергия кристаллизации в зоне образования нанокластеров при действии легких ионов азота и кислорода и тяжелых ионов циркония и гафния (одно-, двух- и трехзарядных) на алюминиевый сплав D16T.

Расчет необходимых дополнительных энергий для получения НС с учетом энергии, затрачиваемой на образование нанокластера

Используя этот алгоритм, рассчитываем новые значения рассматриваемых величин, которые дадут возможность окончательно определить реальность получения наноструктур.

Определив число частиц в нанокластере, мы должны найти энергию атомизации частиц в кластере, которая может быть вычислена с учетом двух энергий: энергии кулоновского отталкивания E_k и энергии ионной связи $E_{и}$ по выражению

© Г.И. Костюк, А.В. Матвеев, Е.А. Воляк, 2015

$$E_{\text{св}} = E_{\text{и}} + E_{\text{к}} = \varepsilon^2 U + (1 - \varepsilon^2)^{\frac{1}{2}} D_0 N = -\frac{\varepsilon^2 k A \varepsilon^2 z^2 N}{R_0} \left(1 - \frac{\rho}{R_0}\right) + (1 - \varepsilon^2)^{\frac{1}{2}} D_0 N, \quad (1)$$

где ε – степень ионности; k – коэффициент пропорциональности, называемый электростатической постоянной, зависит от выбора единиц измерения, в Международной системе единиц, $k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \approx 8,987742438 \cdot 10^9 \left[\frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{Кл}^2}\right]$; A – константа Моделунга; e – заряд электрона, $e = 1,6022 \cdot 10^{-19}$ [Кл]; z – заряд иона; N – количество частиц; R_0 – кратчайшее межатомное расстояние; ρ – степень отталкивания; D_0 – энергия диссоциации одной частицы вещества

Степень ионности ε для вещества АВ определяем по выражению

$$\varepsilon = \frac{I_A^V + F_A^V - I_B^V - F_B^V}{I_A^V - F_A^V + I_B^V - F_B^V}, \quad (2)$$

где I_A^V – потенциал ионизации для элемента А в валентном состоянии; F_A^V – сродство к электрону для материала А в валентном состоянии.

Эти величины обычно определяются экспериментально, значения их известны для небольшого числа элементов. Для упрощения вычисления можно использовать упрощенную формулу, дающую менее точное значение:

$$\varepsilon = \frac{X_A - X_B}{X_A + X_B}, \quad (3)$$

где X_A , X_B – степень окисления для элементов А и В по шкале Полиннга.

Константа Моделунга A , вычисляемая суммированием бесконечного ряда, имеет вид

$$A = \sum_j^N \frac{z_i z_j}{P_{ij}}, \quad (4)$$

где z_i , z_j – заряды взаимодействующих ионов

Энергия электростатического кулоновского взаимодействия

$$\varphi_{ij} = \frac{e^2 z_i z_j}{R_{ij}}, \quad (5)$$

где R_{ij} – расстояние между зарядами i и j , для удобства оно может быть представлено как $R_{ij} = P_{ij} \cdot R_0$.

Тогда энергия взаимодействия i иона со всеми остальными ионами (N) имеет вид

$$U = \frac{1}{2} \left(N \sum_i^N \frac{e^2 z_i z_j}{R_0} * \frac{1}{P_{ij}} + N \sum_j^N \frac{e^2 z_i z_j}{R_0} * \frac{1}{P_{ij}} \right) = \frac{N e^2}{R_0} \sum_j^N \frac{z_i z_j}{P_{ij}}. \quad (6)$$

В формуле множитель $\frac{1}{2}$ появляется, так как каждая взаимодействующая пара ионов должна учитываться один раз. Очевидно, что постоянная в выражении для электростатической энергии называется константой Моделунга.

Константу Моделунга A , получаем суммированием бесконечного ряда, зависящего от геометрического типа структуры (она не зависит от периода идентичности, то есть межатомных расстояний). Для структуры типа NaCl прямое суммирование с помощью ЭВМ в пределах куба, содержащего почти 70 000 ионов, дает $A = 1,747163$. Это значение еще

существенно уступает по точности лучшим значениям, полученным с помощью различных методов ускорения сходимости подобных рядов. Так, для структуры типа NaCl известна константа Моделунга с огромным количеством значащих цифр: $A = 1,747564946331822$. Расчеты с подобной точностью для простых структур и с меньшей точностью, но для сложных структур, возможны лишь с помощью различных способов ускорения сходимости рядов, разработанных Моделунгом, Борном, Эвальдом, Эвьеном, Берто и другими.

Степень отталкивания ρ зависит от величины и характера деформирования зерна

По мере увеличения сжатия сопротивление кристалла быстро растет, ионы отталкиваются друг от друга и силы отталкивания быстро возрастают по мере сближения ионов друг с другом. Поскольку отталкиваются электронные оболочки ионов, проникающие одна в другую, то правильное описание этих сил возможно только на основе квантовой механики. Однако эвристический (т. е. основанный на правильной догадке) подход был применен М. Борном и его сотрудниками еще до создания квантовой механики (1918). Они предложили две формы потенциала отталкивания: сначала обратную степенную $\frac{b}{R^n}$, а позже экспоненциальную $B e^{-\frac{R}{\rho}}$. Параметры b и n , B и ρ , входящие в эти выражения, могут быть определены с помощью экспериментальных данных, в частности по сжимаемости кристалла:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{2}{R_0} + \frac{9V}{A\beta}, \quad (7)$$

где V – объем моля кристалла; A – константа Моделунга; β – сжимаемость кристалла.

Существует связь между показателем отталкивания и орбитальными экспонентами связывающих атомные орбитали. Для щелочных галогенидов имеется простая зависимость между $\frac{1}{\rho}$ и суммой орбитальных экспонент атомных орбиталей щелочного металла (М) и галогена (Х):

$$\frac{1}{\rho} = 2(\xi_{\text{H}} + \xi_{\text{X}}). \quad (8)$$

Простую и достаточно точную оценку величины орбитальной экспоненты можно получить с помощью извлечения квадратного корня из первого потенциала ионизации, выраженного в ридбергах ($1Ry = 13,6 \text{ эВ} = 313 \text{ ккал}$):

$$\xi = \sqrt{I}. \quad (9)$$

Для оксидов и особенно халькогенидов эта зависимость будет другой, так как растёт влияние ковалентности химической связи. Приблизительно эта зависимость имеет вид

$$\frac{1}{\rho} \approx (1 + \varepsilon)(\xi_{\text{H}} + \xi_{\text{X}}). \quad (10)$$

Таким образом, энергию отталкивания атомов в кристалле довольно легко оценить, если нет возможности определить ее эмпирическим путем.

Межатомное расстояние R_0 может быть определено для вещества АВ как сумма ковалентных радиусов

$$R_0 = R_{\text{к}}(\text{А}) + R_{\text{к}}(\text{В}); \quad (11)$$

Экспериментальное значение, энергии диссоциации измерено для многих веществ.

Для избежания ограничений при оценке ковалентной энергии, для D_0 кристаллов применен обобщенный постулат Полинга о среднем арифметическом:

$$D_0 = \sum_{i=1}^m \Delta H_{\text{эф}}(i); \quad (12)$$

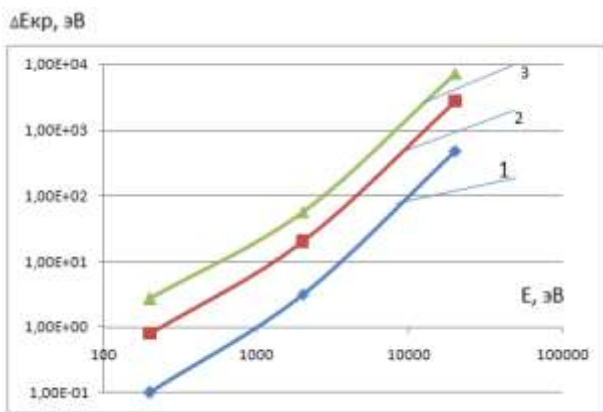
В результате расчетов мы получаем энергию атомизации для химических соединений при различных зарядовых числах, степенях отгалкивания и энергиях диссоциации. так, для ряда нитридов и карбидов они представлены в таблице 1:

Таблица 1 – Энергия атомизации для нитридов и карбидов металлов при различных зарядовых числах Z, степенях отгалкивания ρ и энергиях диссоциации D

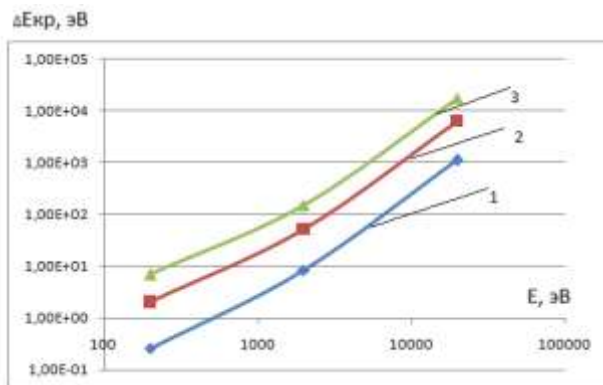
Материал покрытия	Степень отгалкивания $\rho, [M]$	Теория			Эксперимент		Энергия диссоциации D, эВ
		Z=1	Z=2	Z=3	Z=1	Z=2	
TiN	0,287 10^{-10}	5,756	9,125	14,74		13,23	4,9035
TiN	0,854 10^{-10}	5,3989	7,6966	11,526		13,23	4,9035
TiN	0,4326 10^{-10}	5,664	8,7586	13,9156		13,23	4,9035
TiN	0,287 10^{-10}	10,347	13,716	19,331		13,23	9,7622
TiN	0,854 10^{-10}	9,9899	12,288	16,117		13,23	9,7622
TiN	0,4326 10^{-10}	10,256	13,350	18,507		13,23	9,7622
ZrN	0,287 10^{-10}	6,874	11,4427	19,0572		14,53	5,8148
ZrN	0,943 10^{-10}	6,3518	9,3539	14,3574		14,53	5,8148
ZrN	0,4126 10^{-10}	6,7741	11,0431	18,1574		14,53	5,8148
ZrN	0,287 10^{-10}	11,760	16,328	23,943		14,53	11,124
ZrN	0,943 10^{-10}	11,238	14,240	19,244		14,53	11,124
ZrN	0,4126 10^{-10}	11,66	15,929	23,044		14,53	11,124
AlN	0,295 10^{-10}	4,476	7,376	12,209		10,169	
AlN	0,851 10^{-10}	4,153	6,084	9,304		10,169	
AlN	0,450 10^{-10}	4,386	7,016	11,399		10,169	
HfN	0,282 10^{-10}	6,740	9,4589	13,9889		16,09899	
HfN	0,806 10^{-10}	6,4919	8,4629	11,7479		16,09899	
HfN	0,433 10^{-10}	6,6699	9,1749	13,349		16,09899	
TiC	0,309 10^{-10}	5,377	7,253	10,380		14,23	
TiC	0,820 10^{-10}	5,197	6,536	8,766		14,23	
TiC	0,495 10^{-10}	5,311	6,990	9,790		14,23	
CrN	0,288 10^{-10}	4,897	7,766	12,547			
CrN	0,815 10^{-10}	4,590	6,538	9,785			
CrN	0,445 10^{-10}	4,806	7,390	11,724			
HfC	0,318 10^{-10}	6,3631	9,444	14,580		16,4895	
HfC	0,943 10^{-10}	6,024	8,087	11,526		16,4895	
HfC	0,481 10^{-10}	6,275	9,091	13,785		16,4895	
TiO ₂	0,293 10^{-10}	16,3935	29,052	50,1495			
TiO ₂	0,947 10^{-10}	14,823	22,77	36,015			
TiO ₂	0,424 10^{-10}	16,079	27,794	47,319			
TiO ₂	0,293 10^{-10}	79,686	29,052	45,93			
TiO ₂	0,947 10^{-10}	54,558	22,77	33,366			
TiO ₂	0,424 10^{-10}	260,958	27,794	43,414			
CrC	0,310 10^{-10}	11,757	13,212	15,637			
CrC	0,786 10^{-10}	11,616	12,648	14,368			
CrC	0,511 10^{-10}	12,009	14,22	17,905			
ZrC	0,309 10^{-10}	13,9275	16,821	21,643		15,6217	
ZrC	0,902 10^{-10}	13,628	15,624	18,950		15,6217	
ZrC	0,470 10^{-10}	13,792	16,495	20,909		15,6217	

Используя значения энергии атомизации представленные в таблице, и зная число частиц в нанокластере, которое получаем, используя результаты рабо-

ты [1], получаем энергию необходимую для получения зерна.

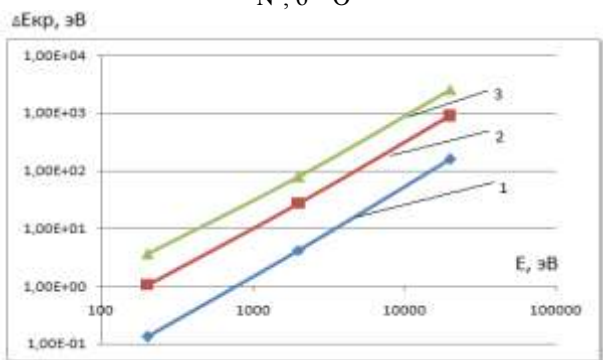


а

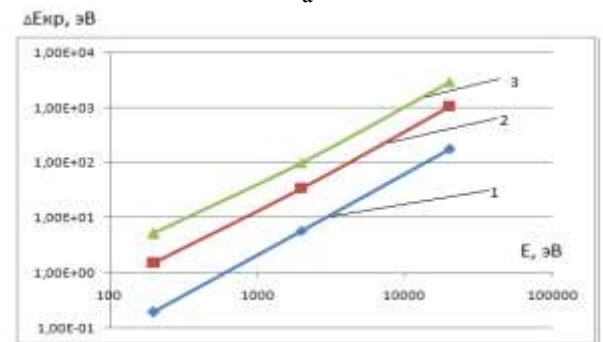


б

Рис. 1 – Зависимость дополнительной энергии кристаллизации от энергии ионов при разных зарядах иона (кривая 1-1, 2-2, 3-3), действующих на алюминиевый сплав Д16Т: а – N^+ ; б – O^+



а



б

Рис. 2 - Зависимость дополнительной энергии кристаллизации от энергии ионов при разных зарядах иона (кривая 1-1, 2-2, 3-3), действующих на алюминиевый сплав Д16Т: а – Zr^+ ; б – Hf^+

Для обеспечения большей вероятности его образования увеличиваем эту величину на 10% и используем в дальнейших расчетах. Так, результаты такого исследования представлены на рис. 1 и 2.

Так, на рис. 1 даны зависимости дополнительной энергии образования нанокластера от энергии ионов азота и кислорода при действии их на алюминиевый сплав. Очевидно, что в этом случае дополнительные энергии, затрачиваемые на кристаллизацию, соизмеримы с энергией ионов, действующих на материал, тогда как при переходе к ионам циркония и гафния (рис. 2 а, б) эта величина практически на порядок меньше энергии ионов (при энергиях $2 \cdot 10^4$ эВ) и в этом случае очевидно, что её можно не учитывать.

Всё это говорит о том, что энергия кристаллизации является важной величиной и в балансе энергий в зоне образования наноструктуры для ионов малых масс может оказывать существенное влияние. При переходе к ионам больших масс, например гафния, её практически можно не учитывать.

Выводы

1. Создана модель вероятности образования наноструктур, которая учитывает энергию получения НК, что позволяет существенно уточнить существующие модели.

2. Показано, что для небольших энергий ионов, энергия образования НК существенно влияет на характер теплообмена, а следовательно, и на характеристики, определяющие возможность получения наноструктур: температура, скорость нарастания температуры, температурные напряжения и скорость деформирования.

3. Полученная модель позволяет существенно уточнить проводимые расчеты основных величин, определяющих получение наноструктур, и найти более точно технологические параметры потоков ионов (энергия, заряд и сорт иона), при которых можно получать наноструктуры необходимых размеров, а следовательно, и прогнозировать их физико-механические характеристики, так как они зависят от размера зерна.

4. Показано определяющее влияние на энергообмен в зоне действия легких ионов (например, азот и кислород) энергии кристаллизации для кластеров. Для тяжелых ионов энергия кристаллизации не превышает 10% от энергии падающего иона (даже для энергии $2 \cdot 10^4$ эВ).

Библиографический список. 1. Костюк, Г.И. Нанотехнологии: выбор технологических параметров и установок, производительность обработки, физико-механические характеристики наноструктур [Текст]: моногр. / Г.И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2014. – 472 с. 2. Костюк, Г.И. Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы [Текст]: моногр. / Г.И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 648 с. 3. Костюк, Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст] / Г.И. Костюк. – К.: Изд-во аину, 2002.– Кн.1: Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, свето-

лучевых и комбинированных технологий. – 596 с. **4.** Костюк, Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст] / Г.И. Костюк. – К.: Изд-во аиу, 2002. – Кн. 2: Справочник для расчета основных физических и технологических параметров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования. – 482 с. **5.** Костюк, Г.И. Наноструктуры и нанопокрyтия: перспективы и реальность [Текст]: учеб. пособие / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с. **6.** Костюк, Г.И. Научные основы создания современных технологий [Текст]: учеб. пособие / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2008. – 552 с. **7.** Костюк, Г.И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем [Текст]: моногр.-справ. / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 633 с. **8.** Костюк, Г.И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем [Текст]: справ. / Г.И. Костюк. – К.: Вид-во АИНУ, 2003. – 412 с. **9.** Костюк, Г.И. Физико-технические основы роботизированного производства [Текст]: учеб. пособие / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. – 614 с. **10.** Гречихин, Л.И. Физика наночастиц и нанотехнологий [Текст] / Л.И. Гречихин. – М.: УП «Технопринт», 2004. – 397 с. **11.** Аксенов, И.И. Вакуумная дуга в эрозийных источниках плазмы [Текст] / И.И. Аксенов. – Х.: Изд-во НИИ «ХФТИ», 2005. – 211 с. **12.** Гусев, А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии [Текст] / А.И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с. **13.** Решетняк, Е.Н. Синтез упрочняющих наноструктурных покрытий [Текст] / Е.Н. Решетняк, А.И. Стрельницкий // Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – № 2. – С. 119 – 130. **14.** Андриевский, Р.А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы [Текст] / Р.А. Андриевский // Физика металлов и металловедение. – 2003. – Т. 91, № 1. – С. 50 – 56. **15.** Состав, структура и свойства наноструктурных пленок боридов тантала [Текст] / А.А. Гончаров, П.И. Игнатенко, В.В. Петухов и др. // ЖТФ. – 2006. – Т. 76, вып. 10. – С. 82 – 87.

Bibliography (transliterated): **1.** Kostyuk, G.I. Nanotekhnologii: vybor tekhnologicheskikh parametrov i ustanovok, proizvoditel'nost' obrabotki, fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki nanostruktur [Текст]: monogr. / G.I. Kostyuk. – Kiev: Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovatP. tekhnologiy, 2014. – 472 P. **2.** Kostyuk, G.I. Nanotekhnologii: teoriya, eksperiment, tekhnika, perspektivy [Текст]: monogr. / G.I. Kostyuk. – Kiev: Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovatP. tekhnologiy, 2012. – 648 P.

3. Kostyuk, G.I. Fiziko-tekhnicheskiye osnovy naneseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy [Текст] / G.I. Kostyuk. – Kiev: Izd-vo ainu, 2002. – Кн.1: Fizicheskiye protsessy plazmenno-ionnykh, ionno-luchevykh, plazmennykh, svetoluchevykh i kombinirovannykh tekhnologiy. – 596 P. **4.** Kostyuk, G.I. Fiziko-tekhnicheskiye osnovy naneseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazer-noy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy [Текст] / G.I. Kostyuk. – Kiev: Izd-vo ainu, 2002. – Кн. 2: Spravochnik dlya rascheta osnovnykh fizicheskikh i tekhnologicheskikh parametrov, otsenki vozmozhnostey, vybora tipa tekhnologiy i oborudovaniya. – 482 P. **5.** Kostyuk, G.I. Nanostrukturny i nanopokrytiya: perspektivy i real'nost' [Текст]: ucheb.posobiye / G.I. Kostyuk. – Kharkov: NatP. aerokosm. un-t «Khark. aviatP. in-t», 2009. – 406 P. **6.** Kostyuk, G.I. Nauchnyye osnovy sozdaniya sovremennykh tekhnologiy [Текст]: ucheb.posobiye / G.I. Kostyuk. – Kharkov: NatP. aerokosm. un-t «Khark. aviatP. in-t», 2008. – 552 P. **7.** Kostyuk, G.I. Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem [Текст]: monogr.-sprav. / G.I. Kostyuk. – Kharkov: NatP. aerokosm. un-t «Khar'k. aviatP. in-t», 2007. – 633 P. **8.** Kostyuk, G.I. Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem [Текст]: sprav. / G.I. Kostyuk. – Kiev: Vid-vo AINU, 2003. – 412 P. **9.** Kostyuk, G.I. Fiziko-tekhnicheskiye osnovy robotizirovannogo proizvodstva [Текст]: ucheb.posobiye / G.I. Kostyuk. – Kharkov: NatP. aerokosm. un-t «Khar'k. aviatP. in-t», 2006. – 614 P. **10.** Grechikhin, L.I. Fizika nanochastits i nanotekhnologiy [Текст] / L.I. Grechikhin. – Moscow: UP «Tehnoprint», 2004. – 397 P. **11.** Aksekov, I.I. Vakuumnaya duga v eroziyonykh istochnikakh plazmy [Текст] / I.I. Aksekov. – Kharkov: Izd-vo NI «KhFTI», 2005. – 211 P. **12.** Gusev, A.I. Nanomaterialy, nanostrukturny, nanotekhnologii [Текст] / A.I. Gusev. – Moscow: Fizmatlit, 2005. – 416 P. **13.** Reshetnyak, Ye.N. Sintez uprochnyayushchikh nanostrukturnykh pokrytiy [Текст] / Ye.N. Reshetnyak, A.I. Strel'nitskiy // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. – 2008. – No 2. – PP. 119 – 130. **14.** Andriyevskiy, R.A. Nanomaterialy: kontseptsiya i sovremennyye problemy [Текст] / R.A. Andriyevskiy // Fizika metallov i metallovedeniye. – 2003. – Vol. 91, No 1. – PP. 50 – 56. **15.** Sostav, struktura i svoystva nanostrukturnykh plenok boridov tantala [Текст] / A.A. Goncharov, P.I. Ignatenko, V.V. Petukhov i dr. // Zhhf. – 2006. – Vol. 76, No. 10. – PP. 82 – 87.

Поступила (received) 12.10.2015

Костюк Геннадий Игоревич – д-р техн. наук, проф., проф. Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Kostyuk Gennadiy Igorevich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Aerospace University «KhAI», tel.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Матвеев Александр Вадимович – аспирант, Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06;

Matveev Aleksandr Vadymovich – graduate student, National Aerospace University «KhAI», tel.: (057)-788-42-06;

Воляк Елена Александровна – канд. техн. наук, Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06;

Voliak Elena Aleksandrovna – Candidate of Technical Sciences, National Aerospace University «KhAI», tel.: (057)-788-42-06.

УДК 621.923

В. Н. ГЕЙЧУК, В. А. МОСЕЙЧУК**ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ КОНЦЕВОГО И ОСЕВОГО ИНСТРУМЕНТА НА РОТОРНЫХ СТАНКАХ**

В данной работе выполнен сравнительный анализ производительности магнитно-абразивной обработки на РТК с магнитными системами "кольцевая ванна" двух типов. Первая из них - магнитная система с радиальной загрузкой с вращающимися полюсными наконечниками на постоянных магнитах, вторая - электромагнитная система с торцевой загрузкой с неподвижными полюсными наконечниками. В результате проведенных исследований определено, что более продуктивным является РТК, состоящий из станка со шестишпindelной роторной головкой и магнитной системы второго типа. При этом величина вспомогательного времени меньше в РТК, который состоит из магнитной системы первого типа и одношпindelного блока в схвате робота.

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка, роторный станок, робот, производительность, осевой инструмент.

Вступление. Применение высокоскоростных методов резания и агрессивных смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) делает актуальным повышение эксплуатационных свойств режущего инструмента. Перспективным методом финишной обработки, потенциально способным в комплексе обеспечить необходимые свойства режущего инструмента, в частности концевой и осевой, является магнитно-абразивная обработка (МАО) в кольцевой ванне в условиях больших рабочих зазоров. Этот способ относится к так называемым объемным способам обработки и позволяет обработать детали сложной конфигурации, в т.ч. с полузакрытыми пазами и карманами. Кроме того, данный способ обработки должен обладать высокой производительностью, поскольку предполагает использование станков роторного типа.

Анализ последних достижений и литературы. Ранее этому способу обработки достаточно большое внимание уделили основатели магнитно-абразивной обработки [1, 5, 11, 12] и их последователи [6 - 9, 14, 17]. За последние годы появилось достаточно большое количество работ посвященных объемной МАО деталей различных типов [2, 3, 4, 15, 19]. Большинство этих работ посвящено в основном исследованию влияния магнитно-абразивного инструмента [4, 8, 15], технологических режимов и приспособлений [4, 6, 8, 10, 15, 17, 19] на качество обработки изделий. Некоторые из них [2, 3, 10, 12] посвящены вопросам разработки оборудования для реализации данного способа обработки. Как известно, магнитные системы типа "кольцевая ванна" делятся на два типа: с торцевой [1 - 4, 7, 8, 11, 12, 14, 15, 19] и радиальной загрузкой [1, 6, 9, 11, 12, 17] с неподвижными [2, 3, 4, 7, 8, 11, 12, 14, 15, 19] и вращающимися [1, 11, 12, 19] полюсными наконечниками. Кроме того, еще одной характерной конструктивной особенностью обеих типов магнитных систем является источник магнитного поля: от постоянных магнитов [1, 6, 9, 11, 12] и от электромагнита постоянного или выпрямленного тока [2, 3, 4, 7, 8, 11, 12, 14, 15, 19,]. В работе [5] установлено, что в общем случае процесс МАО наиболее эффективен, если магнитный поток создается выпрямленным двухполупериодным электрическим током.

Как отмечается в этих и других работах [17], обрабатываемость материалов магнитно-абразивным методом и производительность является весьма сложной функцией физико-механических свойств заготовок, технологических режимов процесса, параметров магнитно-абразивных порошков (МАП) и СОТС. Особую степень влияния авторы отводят схеме обработки и кинематике процесса. В частности, в работе [19] проведены сравнительные исследования качества обработки в магнитных системах - электромагнитной с торцевой загрузкой с неподвижными полюсными наконечниками [18] и с радиальной загрузкой с вращающимися полюсными наконечниками на постоянных магнитах [20]. Качество обработки (по показателям: шероховатость поверхностей, округление кромок, микротвердость и остаточные напряжения) оказались выше при обработке в магнитной системе первого типа. Автором [19] было высказано предположение, что одной из основных причин разности в качестве обработки по обеим схемам является разная кинематика процессов.

Однако сравнительного анализа производительности обработки по этим двум принципиальным схемам в доступных источниках не обнаружено.

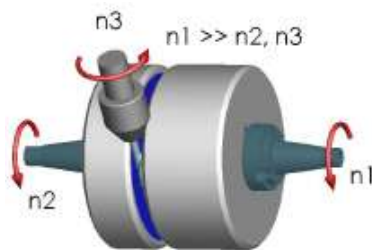
Цель работы. Целью данной работы является сравнительный анализ производительности магнитно-абразивной обработки в магнитных системах с радиальной загрузкой с вращающимися полюсными наконечниками на постоянных магнитах и электромагнитной с торцевой загрузкой с неподвижными полюсными наконечниками.

Постановка задачи. Для сравнительного анализа были выбраны две принципиальные схемы обработки. На базе магнитной системы с радиальной загрузкой с вращающимися полюсными наконечниками на постоянных магнитах построены станки серий MF 62 и MF 72 фирмы Magnetfinish GmbH, Германия [20]. Общий вид станка серии MF 72 и схема движений, реализуемых в станках, показана на рис. 1. Станки предназначены для снятия заусенцев, округления режущих кромок и полировки поверхностей на осевых и концевых режущих инструментах диаметром $0,1 \div 16$ мм или $0,1 \div 25$ мм. MF 62С предназначен для обработки инструментов диаметром от 0,1 мм до 25 мм.

© В. Н. Гейчук, В. А. Мосейчук, 2015



а



б

Рис. 1 – Станок серии MF 72: а – общий вид станка серии MF 72; б – схема движений, реализуемых в станках

Станки имеют два различных модуля для обработки концевой рабочей и цилиндрической частей инструментов. Это позволяет обрабатывать, например, главные режущие кромки сверл, сферических концевых фрез, и режущие кромки на цилиндрической части, а также полировать канавки. Станки обеих серий имеют устройства автоматической загрузки МАП. Загрузку / выгрузку заготовок в рабочую зону, начальную установку и движение круговой подачи осуществляет поштучно робот. Станки серии MF 72 имеют два магазина на 120 заготовок, как заявляет фирма, для 24 часовой непрерывной работы. Станки серии MF 62 поставляются как с магазином, так и без него.

На кафедре конструирования станков и машин НТУУ "КПИ" была спроектирована гамма роторных станков [3] для MAO деталей сложной формы, построенных с использованием модульного принципа. Одним из основных модулей является магнитная система типа "кольцевая ванна" с торцевой загрузкой с неподвижными полюсными наконечниками [18]. На базе станка для обработки концевой и осевого инструментов разработан робото-технический комплекс (РТК) (рис. 2).

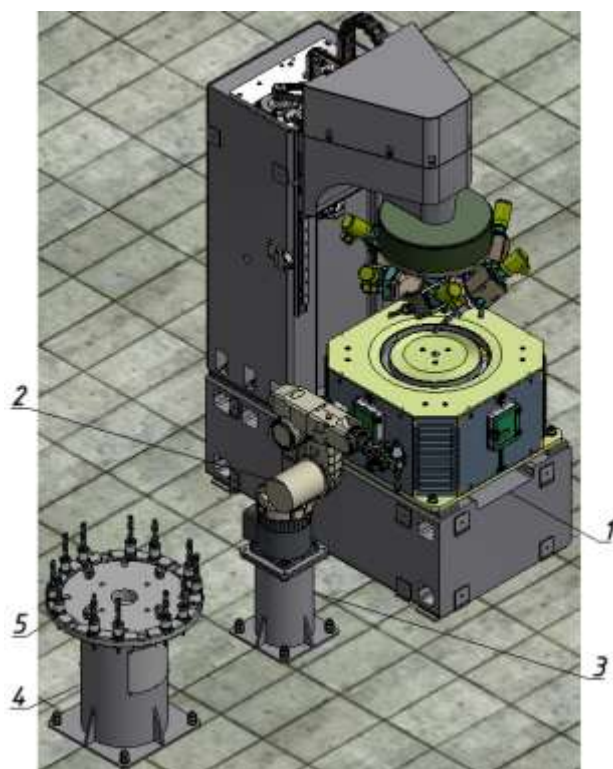


Рис. 2 - Общий вид РТК для MAO концевой и осевого инструмента

РТК предназначен для снятия заусенцев, округления режущих кромок и полировки и упрочнения поверхностей на осевых и концевых режущих инструментах диаметром $0,1 \div 25$ мм. В состав РТК входят шестишпindelный роторный станок 1, универсальный легкий шестиосный промышленный робот (ПР) 2 модели KR5-SIXX-R650 компании KUKA Roboter GmbH (Германия) с угловой системой координат, установленный на колонне 3; поворотный стол индексации 4 со сменным дискообразным лотком 5, в котором размещаются 18 заготовок, установленных в приспособлениях-спутниках (ПС). Ограждение рабочей зоны РТК на рисунке не показано. ПР 2 последовательно извлекает из шпинделя каждой рабочей головки готовые детали, устанавливает в гнездо лотка 5, извлекает из гнезда заготовку и устанавливает в зажимное электромеханическое приспособление рабочей головки.

Во время обработки заготовки осуществляют следующие движения:

- главное движение резания со скоростью V_p - вращение роторной головки;
- движение основной круговой подачи со скоростью V_S - вращение заготовки вокруг своей оси;
- вертикальное перемещение роторной головки со скоростью V_Z - движение резания.

Сравнительные расчеты производительности выполнялись для сверл диаметром 10 мм, общей длиной $L = 184$ мм и с длиной рабочей части $l = 121$ мм, ориентировочный средний годовой объем выпуска деталей $N = 50000$ шт; среднее количество дней, на которые нужно обеспечить запас деталей $t = 5$.

Материалы и результаты исследования.**РТК со шестишпиндельной роторной головкой и магнитной системой с торцевой загрузкой**

Последовательность обработки: опускание роторной головки на высоту рабочей зоны ($B_{ПН} = 30$ мм); позонная по длине рабочей части инструмента обработка при ступенчатом перемещении на высоту рабочей зоны со скоростью вертикальной подачи $S_Z = 250$ мм/мин [8] и с промежуточными остановками подачи на $t_{ост} = 35$ с (0,58 мин); вывод инструмента из рабочей зоны на рабочей подаче.

Штучно-калькуляционное время [13]:

$$T_{шт-к} = T_{шт} + T_{нз}/n, \quad (1)$$

где $T_{шт}$ - штучное время, затрачиваемое на обработку одной заготовки;

$T_{нз}$ - подготовительно-заключительное время, затрачиваемое на всю партию, включающее время на подготовку и наладку РТК;

$n = (N \cdot t)/F = 976$ шт - количество заготовок в партии;

$F \approx 256$ дн. - годовой фонд рабочего времени в днях.

Штучное время:

$$T_{шт} = T_{ом} + T_{д} + T_{об} + T_{н}, \quad (2)$$

где $T_{ом}$ - основное технологическое время;

$T_{д}$ - вспомогательное время, включающее в себя: время на установку заготовки в рабочую зону и удаление детали из рабочей зоны T_y ; время на управление станком РТК T_{yn} ; время холостых ходов T_{xx} ; время индексации $T_{ин}$ (поворот лотков с заготовками, поворот роторной головки на одну позицию); время на замену порции отработанного порошка; время на контрольные измерения T_k ;

$$T_{д} = T_y + T_{yn} + T_{xx} + T_{зм} + T_k; \quad (3)$$

$T_{об}$ - время технического и организационного обслуживания рабочего места;

$T_{н}$ - время перерывов на отдых и физиологические потребности.

Для данного РТК принимаем: $T_n = 0$; $T_k = 0$, так это время полностью перекрывается оперативным временем $T_{он} = T_{ом} + T_{д}$, и контрольные операции проводятся по окончании цикла обработки и вне РТК; $T_{зм} = 0$, так как необходима только периодическая замена порции магнитно-абразивного порошка, время на его замену входит составляющей в $T_{об}$; $T_{yn} = 0$, так как управление автоматическим циклом осуществляется системой ЧПУ в сочетании с контроллером ПР.

Время технического и организационного обслуживания принимаем в размере 1% от оперативного времени: $T_{об} = 0,01 \cdot T_{он}$.

Длину рабочего хода определяем с учетом угла наклона оси заготовки $\xi = 50^\circ$.

$$L_{р.х.} = l \cdot \cos(\xi) = 78 \text{ мм}. \quad (4)$$

Количество промежуточных остановок $i_o = L_{р.х.}/B_{ПН} = 2,6$; принимаем $i_o = 3$.

Основное технологическое время при количестве одновременно обрабатываемых заготовок $i_{заг} = 6$:

$$T_{ом} = 2L_{р.х.}/(i_{заг} \cdot S_Z) + i_o \cdot t_{ост}/i_{заг} = 0,394 \text{ мин.} \quad (5)$$

Время холостых ходов:

$$T_{xx} = 2L_{х.х.}/(i_{заг} \cdot S_{бн}) = 0,025 \text{ мин.}, \quad (6)$$

где $L_{х.х.} = 222$ мм - длина холостого хода;

$S_{бн} = 3000$ мм/мин - скорость быстрого подвода / отвода шпиндельной бабки.

Для определения времени на установку и смену заготовок необходимо определить время движения схвата ПР (рис. 3, а) по траектории (рис. 3, б) при выполнении цикла снятия и установки приспособлений-спутников.

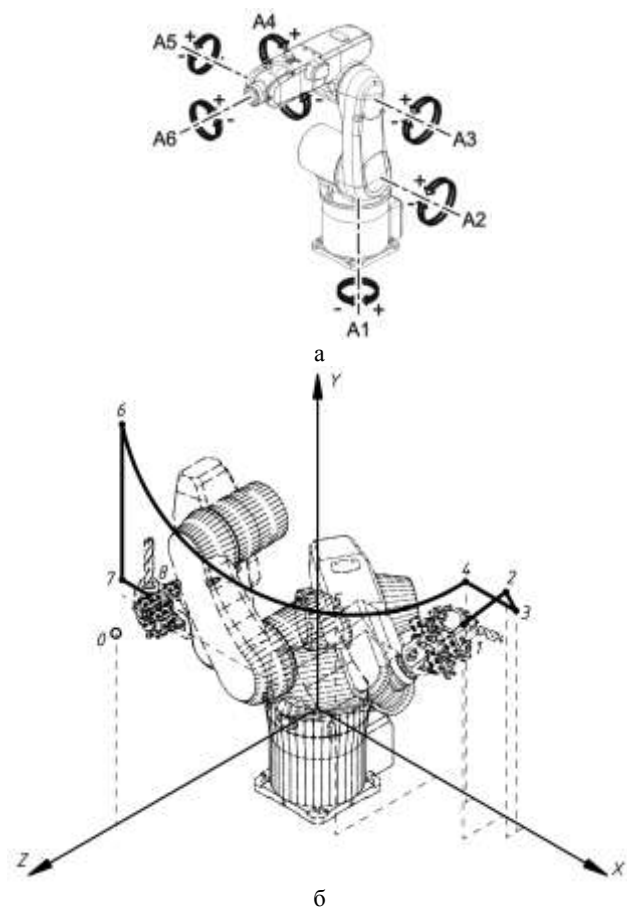


Рис. 3 - ПР мод. KR5-SIXX-R650 : а – оси ПР мод. KR5-SIXX-R650; б – траектория движения его схвата при выполнении цикла установки и замены приспособлений-спутников (координаты точек траектории приведены в таблице 1)

Расчет времени движения рабочего органа ПР по участкам траектории выполнялся при максимально

допустимых относительных угловых скоростях, при этом учитывалось, что контроллер ПР при интерполяции по осям снижает фактические угловые скорости быстрых перемещений. Время движения принималось

по наибольшему времени для данного участка. Результаты расчета приведены в таблице 2. Цикл работы лотка и время цикла представлены в таблице 3.

Таблица 1 - Координаты характерных точек траектории движения рабочего органа ПР (по рис. 3)

№ точки	Координаты (x; y; z), мм	Угловые координаты по осям ПР, град					
		A1	A2	A3	A4	A5	A6
0	(0; 492; 598,3)	0,0°	-90,0°	+90,0°	0,0°	0,0°	0,0°
1	(551; 551,2; 119,7)	-60,54°	-63,76°	+75,98°	-133,05°	+88,99°	+76,57°
2	(611; 630,8; 52,9)	-70,09°	-47,15°	+35,14°	-130,141°	+65,64°	+76,57°
3	(611; 567,3; 22,8)	-78,15°	-61,77°	+70,17°	-137,68°	+74,09°	+86,32°
4	(461; 567,3; 22,8)	-73,27°	-94,44°	+108,68°	-136,82°	+81,63°	+86,78°
5	(351,3; 567,3; 299,4)	-30,0°	-94,44°	+108,68°	-136,82°	+81,63°	+86,78°
6	(-580; 439; 0)	+90,0°	-96,22°	+106,0°	-180,0°	+9,78°	0,0°
7	(-580; 40,2; 0)	+90,0°	-48,15°	+136,87°	-180,0°	+88,71°	0,0°
8	(-500,4; 40,2; 0)	+90,0°	-52,7°	+153,42°	-180,0°	+100,71°	0,0°

Примечание: точка 0 - исходное положение ПР; участок 2-3 - установка ПС в рабочий шпиндель или снятие; участок 4-3 - отвод ПС от шпиндельной бабки или подвод к ней; участок 4-5 - выход из рабочего пространства станка в свободную зону; участок 6-7 установка ПС на лоток или снятие с лотка; точки 1 и 8 - положение перед вводом захватного устройства (ЗУ) для захвата приспособления-спутника (ПС), в шпинделе или в лотке (соответствуют участкам траектории 1-2 и 8-7)

Таблица 2 - Продолжительность движения по участкам траектории при максимально допустимых угловых скоростях ПР с максимальной полезной нагрузкой 5 кг

Участок	Диапазоны изменения углов Δ (град), скорости (град/с), времени движения t (с) по осям и максимальное время t _{max} (с)																		t _{max}
	A1			A2			A3			A4			A5			A6			
	Δ	v	t	Δ	v	t	Δ	v	t	Δ	v	t	Δ	v	t	Δ	v	t	
0-8	90	375	0,24	37,3	300	0,12	53,4	375	0,14	180	410	0,44	100,7	410	0,25	0	660	0,0	0,44
0-1	60,6	375	0,16	26,3	300	0,09	14,02	375	0,04	133,1	410	0,33	89,0	410	0,22	76,6	660	0,12	0,33
1-2	9,6	375	0,03	16,6	300	0,06	40,9	375	0,11	3,0	410	0,01	23,4	410	0,06	0,0	660	0,0	0,11
2-3	8,1	375	0,03	18,7	300	0,07	35,1	375	0,1	7,6	410	0,02	8,5	410	0,02	9,8	660	0,02	0,1
3-4	4,9	375	0,02	32,7	300	0,11	38,5	375	0,11	0,9	410	0,002	7,6	410	0,02	0,5	660	0,001	0,11
4-5	43,3	375	0,12	0,0	300	0,0	0,0	375	0,0	0,0	410	0,0	0,0	410	0,0	0,0	660	0,0	0,12
5-6	120	375	0,32	1,8	300	0,06	2,7	375	0,008	43,2	410	0,11	71,9	410	0,18	86,8	660	0,14	0,32
6-7	0,0	375	0,0	48	300	0,16	30,9	375	0,09	0,0	410	0,0	79,0	410	0,2	0,0	660	0,0	0,2
7-8	0,0	375	0,0	4,6	300	0,016	16,6	375	0,05	0,0	410	0,0	12,0	410	0,03	0,0	660	0,0	0,05
1-8	151	375	0,41	37,3	300	0,13	63,5	375	0,17	180	410	0,44	101,0	410	0,25	76,6	660	0,12	0,44

Таблица 3 - Цикл работы лотка емкостью 18 инструментов (индексация осуществляется через 2 позиции)

№ цикла	Запись цикла	Время, мин.
Ц	$C_1 \rightarrow 4C_2 \rightarrow C_3 \rightarrow 2(C_1 \rightarrow 4C_5 \rightarrow C_6) \rightarrow C_1 \rightarrow 4C_2 \rightarrow C_3$	3,156
C ₁	$(08) \rightarrow (87) \rightarrow 3 \rightarrow (76) \rightarrow \frac{(65) \rightarrow (54) \rightarrow (43) \rightarrow (32) \rightarrow 3_{III} \rightarrow P \rightarrow (21)}{ИПС} \rightarrow \frac{(18)}{ИШБ}$	0,072
C ₂	$(87) \rightarrow 3 \rightarrow (76) \rightarrow \frac{(65) \rightarrow (54) \rightarrow (43) \rightarrow (32) \rightarrow 3_{III} \rightarrow P \rightarrow (21)}{ИПС} \rightarrow \frac{(18)}{ИШБ}$	0,063
C ₃	$(87) \rightarrow 3 \rightarrow (76) \rightarrow \frac{(65) \rightarrow (54) \rightarrow (43) \rightarrow (32) \rightarrow 3_{III} \rightarrow P \rightarrow (21) \rightarrow (10)}{ИПС}$	0,055
C ₄	$ПШБ \rightarrow (01) \rightarrow (12) \rightarrow 3 \rightarrow P_{III} \rightarrow (23) \rightarrow (34) \rightarrow (45) \rightarrow (56) \rightarrow (67) \rightarrow P \rightarrow (78) \rightarrow ИПС \rightarrow (87) \rightarrow 3 \rightarrow (76) \rightarrow (65) \rightarrow (54) \rightarrow (43) \rightarrow (32) \rightarrow 3_{III} \rightarrow P \rightarrow (21)$	0,213

Таблица 3 – (окончание)

№ цикла	Запись цикла	Время, мин.
Ц_5	$\text{ИШБ} \rightarrow (12) \rightarrow 3 \rightarrow P_{\text{Ш}} \rightarrow (23) \rightarrow (34) \rightarrow (45) \rightarrow (56) \rightarrow (67) \rightarrow P \rightarrow (78) \rightarrow$ $\text{ИПС} \rightarrow (87) \rightarrow 3 \rightarrow (76) \rightarrow (65) \rightarrow (54) \rightarrow (43) \rightarrow (32) \rightarrow 3_{\text{Ш}} \rightarrow P \rightarrow (21)$	0,174
Ц_6	$\text{ИШБ} \rightarrow (12) \rightarrow 3 \rightarrow P_{\text{Ш}} \rightarrow (23) \rightarrow (34) \rightarrow (45) \rightarrow (56) \rightarrow (67) \rightarrow P \rightarrow (78) \rightarrow$ $\text{ИПС} \rightarrow (87) \rightarrow 3 \rightarrow (76) \rightarrow (65) \rightarrow (54) \rightarrow (43) \rightarrow (32) \rightarrow 3_{\text{Ш}} \rightarrow P \rightarrow (21) \rightarrow (10)$	0,18
Ц_7	$\text{ПШБ} \rightarrow (01) \rightarrow (12) \rightarrow 3 \rightarrow P_{\text{Ш}} \rightarrow (23) \rightarrow (34) \rightarrow (45) \rightarrow \left(\frac{56 \rightarrow (67) \rightarrow P \rightarrow (78) \rightarrow (81)}{\text{ИШБ}} \right)$	0,152
Ц_8	$(12) \rightarrow 3 \rightarrow P_{\text{Ш}} \rightarrow (23) \rightarrow (34) \rightarrow (45) \rightarrow \left(\frac{56 \rightarrow (67) \rightarrow P \rightarrow (78) \rightarrow (81)}{\text{ИШБ}} \right)$	0,096
Ц_9	$(12) \rightarrow 3 \rightarrow P_{\text{Ш}} \rightarrow (23) \rightarrow (34) \rightarrow (45) \rightarrow \left(\frac{56 \rightarrow (67) \rightarrow P \rightarrow (78) \rightarrow (80)}{\text{ИШБ}} \right)$	0,063

Примечание: 3 - зажим в захватном устройстве; P - разжим захватного устройства; $3_{\text{Ш}}$ - зажим в рабочем шпинделе; $P_{\text{Ш}}$ - высвобождение из рабочего шпинделя; ПШБ - позиционирование шпиндельной бабки и рабочего шпинделя; ИПС - индексация поворотного стола лотка (паллеты); ИШБ - индексация шпиндельной бабки, позиционирование рабочего шпинделя

Продолжительность цикла рассчитана с учетом коэффициента динамичности $k_d = 1,2$, который учитывает время на разгон и торможение для повышения точности позиционирования на наиболее характерных участках.

Результаты расчета штучно-калькуляционного времени для данного РТК представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Заключительные результаты расчета для магнитной системы с торцевой загрузкой

Время на замену лотка и повторный запуск программы цикла обработки $T_{\text{змл}}$, мин.	1,0
Время на установку заготовки в рабочую зону и удаление детали из рабочей зоны T_y , мин.	0,23
Вспомогательное время T_d , мин.	0,255
Оперативное время $T_{\text{оп}}$, мин.	0,649
Время технического и организационного обслуживания $T_{\text{об}}$, мин.	0,006
Штучное время $T_{\text{шт}}$, мин.	0,655
Подготовительно-заключительное время $T_{\text{пз}} = (10 \dots 20)/976$, мин.	0,01...0,02
Штучно-калькуляционное время $T_{\text{шт-к}}$, мин.	0,665...0,675

РТК с одношпиндельным рабочим блоком на кисти робота и магнитной системой с радиальной загрузкой

На кисти универсального шестиосного ПР KR5-SIXX-R650 установлен шпиндельный блок с нормализованным трехкулачковым пневматическим зажимным устройством, например, производства компании FESTO [21]. Обрабатываемые заготовки размещаются на специальном лотке. После зажима заготовки ин-

струмента в захватном устройстве, робот вынимает заготовку из лотка, переносит в рабочую зону магнитной системы и осуществляет его обработку с тангенциальной или с радиальной подачей [6, 20] величиной $S_p = S_T = 250$ мм/мин. Подача может осуществляться как на входе так и на выходе из рабочей зоны. При этом ПР может менять режим обработки и угол наклона оси заготовки. По окончании обработки ПР устанавливает обработанный инструмент в лоток, отводит кисть от лотка, выполняется индексация поворотного стола и цикл повторяется.

Длина рабочего хода при данной схеме обработки $L_{p.x.} = 121$ мм, длина хода на рабочей подаче при вводе и выводе инструмента $L_{\text{неп.}} = 10 \dots 15$ мм.

Основное технологическое время при тангенциальной подаче с одной остановкой длительностью $t_{\text{ост}}$:

$$T_{\text{от(т)}} = 2 \cdot \frac{L_{p.x.} + L_{\text{неп.}}}{S_T} + t_{\text{ост}} \quad (7)$$

Основное технологическое время при радиальной подаче с тремя промежуточными остановками $i_{\text{ост}} = 3$, угол наклона оси заготовки 40° :

$$T_{\text{от(р)}} = 2 \cdot \frac{L_{p.x.} + L_{\text{неп.}}}{S_p} + i_{\text{ост}} \cdot t_{\text{ост}} \quad (8)$$

Определяем вспомогательное время, траектория движения рабочего органа ПР будет подобной и близкой к траектории движения при предыдущей компоновке. Учитывая относительно большие скорости движения, ориентировочно траектория будет включать участки 0-6 или близка 0-8, 8-7, 7-6, 6-4, 4-8 и 4-0 или близка 1-0 (см. рис 3, табл. 1 и 2). Цикл для лотка емкостью 18 инструментов (табл. 5).

Результаты расчета штучно-калькуляционного времени для данного РТК представлены в таблице 6.

Таблица 5 - Цикл работы лотка емкостью 18 инструментов (коэффициент динамичности $k_d = 1,2$)

№ цикла	Запись цикла	Время, мин.
Ц	$C_1 \rightarrow 16C_2 \rightarrow C_3$	1,405
C_1	(06) \rightarrow (67) \rightarrow 3 \rightarrow (78) \rightarrow (84) \rightarrow (MAO) \rightarrow (48) \rightarrow (87) \rightarrow P \rightarrow (76)	0,07
C_2	ИПС \rightarrow (67) \rightarrow 3 \rightarrow (78) \rightarrow (84) \rightarrow (MAO) \rightarrow (48) \rightarrow (87) \rightarrow P \rightarrow (76)	0,078
C_3	ИПС \rightarrow (67) \rightarrow 3 \rightarrow (78) \rightarrow (84) \rightarrow (MAO) \rightarrow (48) \rightarrow (87) \rightarrow P \rightarrow (76) \rightarrow (60)	0,087

Таблица 6 – Заключительные результаты расчета для магнитной системы с радиальной загрузкой

Время на замену лотка и повторный запуск программы цикла обработки $T_{змл}$, мин.	1,0	
Время на установку заготовки в рабочую зону и удаление детали из рабочей зоны T_y , мин.	0,14	
Вспомогательное время T_o , мин.	0,14	
Оперативное время	$T_{оп(т)}$, мин.	1,808
	$T_{оп(р)}$, мин.	2,504
Время технического и организационного обслуживания $T_{об}$, мин.	0,02	
Штучное время	$T_{шт(т)}$, мин.	1,828
	$T_{шт(р)}$, мин.	2,524
Подготовительно-заключительное время $T_{пз} = (10 \dots 20)/976$, мин.	0,01...0,02	
Штучно-калькуляционное время	$T_{ш-к(т)}$, мин.	1,84...1,85
	$T_{ш-к(р)}$, мин.	2,54...2,55

Выводы.

1. В результате проведенных исследований определено, что более продуктивной РТК со шестишпиндельной роторной головкой, несмотря на то, что продолжительность вспомогательного времени меньше в РТК с одношпиндельных рабочим блоком в руке работа.

2. Резервом для повышения производительности обработки является роторная линия на базе магнитной системы с вращающимися полюсными наконечниками с радиальной загрузкой. Предварительные проработки показывают, что главными недостатками магнитной системы с торцевой загрузкой (в данном случае) является совпадение главного движения резания и движения транспортировки и технические сложности ввода / вывода заготовок в кольцевую ванну.

Список литературы: 1. Барон Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Барон Ю. М. - Л.: Машиностроение, 1986. – 176 с. 2. Гаврушкевич А.

Ю. Анализ кинематики магнитно-абразивной обработки цилиндрических зубчатых колес в кольцевой ванне [Электронный ресурс] / А. Ю. Гаврушкевич, В. Н. Гейчук, // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. - 2015. - Том 3, № 1. С. 21-28. Режим доступа до статті: <http://elibrary.ru/contentP.asp?issueid=1364921>. 3. Гейчук В. М. Синтез кинематики процессу магнітно-абразивної обробки в кільцевій ванні: дис. ... докт. техн. наук: 05.03.01 / Гейчук Володимир Миколайович. - Київ, 2012. – 472 с. 4. Джулій Д.Ю. Підвищення якості багатограничних непереточуваних твердосплавних пластин при магнітно-абразивному обробленні в кільцевій ванні: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. - Київ, 2014. - 175 с. 5. Коновалов Е.Г. Чистовая обработка деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками / Е.Г. Коновалов, Г.С. Шулев.– Мн.: Наука и техника. 1967. – 125 с. 6. Литвиненко В.А. Финишная обработка фасонных поверхностей с высокими требованиями к качеству методом МАП с вращающейся рабочей зоной: дис. ...канд. техн. наук: 05.02.08 / Литвиненко Валентина Алексеевна. – Ленинград, - 1985. – 259 с. 7. Майборода В.С. Магнитно-абразивная обработка специальных деталей: дис. ...канд. техн. наук: 05.02.08 / Майборода Виктор Станиславович. – Киев, - 1988. – 170 с. 8. Майборода В.С. Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь: дис. ...докт. техн. наук: 05.03.01 / Майборода Віктор Станіславович. – Київ, 2001. – 404 с. 9. Михолап С.В. Магнитно-абразивная обработка наружных поверхностей трубчатых изделий: автореф. дисс. на соискание науч. степени канд. техн. наук: 05.03.01, 05.02.08 / С.В. Михолап. - Минск, 1992. - 20 с. 10. Нижник С.Н. Оборудование для магнитно-абразивной обработки сложнофасонных деталей ГТД / С.Н. Нижник, В.И. Куципак, В.А. Матюхин, О.В. Покатов, В.Н. Фандеев // Авиационно-космическая техника и технология, 2004, № 7 (15). С. 220-224. 11. Сакулевич Ф.Ю. Основы магнитно-абразивной обработки/ Ф.Ю. Сакулевич – Мн.: Наука и техника, 1981. – 328 с. 12. Скворчевский Н.Я. Эффективность магнитно-абразивной обработки/Н.Я. Скворчевский, Э.Н. Федорович, П.И. Ящерыцын – Мн.: Наука і техніка, 1991. – 215 с. 13. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 /Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. 496 с. 14. Степанов О.В. Исследование процесса формирования магнитно-абразивного порошкового инструмента для обработки деталей сложной формы: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.06/Степанов Олег Васильевич. - Киев, 1997. - 145 с. 15. Ткачук І.В. Формування магнітно-абразивного інструменту зі стабільними властивостями в робочих зазорах кільцевого типу дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. - Київ, 2015. - 175 с. 17. Хомич Н. С. Магнитно-абразивная обработка изделий: моногр. - Минск: БНТУ, 2006. - 218 с. 18. Пат. 84464 Україна В24В 31/112 (2006.01). Магнітна система для об'ємної обробки ферромагнітними порошками / В.М. Гейчук, В.С. Майборода; заявник та патентовласник. Національний технічний університет України "КПІ". а200611768; заявл. 08.11.2006; опубл. 27.10.2008; бюл. № 20. 19. Byelzaev O. Erhöhung der Leistungsfähigkeit von HSS-Spiralbohrern durch Einsatz der magnetabrasiven Bearbeitung//Dissertation. - 2008. Magdeburg. 20. <http://www.magnetfinish.com>. 21. <http://www.festo.com>.

Bibliography (transliterated): 1. Baron Yu.M. Magnitno-abrazivnaya i magnitnaya obrabotka izdeliy i rezhushchikh instrumentov / Baron Yu. M. - L.: Mashinostroenie, 1986. – 176 P. 2. Gavrushkevich A. Yu. Analiz kinematiki magnitno-abrazivnoy obrabotki tsilindricheskikh zubchatykh kolez v kol'tsevoy vanne [Elektronniy resurs] / A. Yu. Gavrushkevich, V. N. Geychuk, // Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal. - 2015. - Vol 3, No 1. P. 21-28. Rezhim dostupu do statii: <http://elibrary.ru/contentP.asp?issueid=1364921>. 3. Geichuk V. M. Syntez kinematyky protsesu mahnitno-abrazivnoy obrabotky v kiltsevii vannii: dyP. ... dokt. tekhn. nauk: 05.03.01 / Geichuk Volodymyr Mykolaiovych. Kiev, 2012. – 472 P. 4. Dzhuiliy D.Iu. Pidvyshchennia yakosti bahatohrannykh neperetochuvanykh tverdospлавnykh plastyn pry mahnitno-abrazivnomu obroblenni v kiltsevii vannii: dyP. ... kand. tekhn. nauk: 05.03.01. - Kiev, 2014. - 175 P. 5. Konovalov E.G. Chistovaya obrabotka detaley v magnitnom pole ferromagnitnymi poroshkami / E.G. Konovalov, G.P. Shulev.– Minsk: Nauka i tekhnika. - 1967. – 125 P. 6. Litvinenko V.A. Finishnaya obrabotka fasonnykh poverkhnostey s vysokimi trebovani-

yami k kachestvu metodom MAP s vrashchayushcheysya rabochey zony: diP. ...kand. tekhn. nauk: 05.02.08 / Litvinenko Valentina Alekseevna. – Leningrad, - 1985. – 259 P. **7.** Maiboroda V.P. Magnitno-abrazivnaya obrabotka spetsial'nykh detaley: diP. ...kand. tekhn. nauk: 05.02.08 / Maiboroda Viktor Stanislavovich. – Kiev, - 1988. – 170 P. **8.** Maiboroda V.P. Osnovy stvorennia i vykorystannia poroshkovoho mahnitno-abrazivnogo instrumentu dlia finishnoi obrobky fasonnykh poverkhon: dyP. ...dokt. tekhn. nauk: 05.03.01 / Maiboroda Viktor Stanislavovich. – Kiev, 2001. – 404 P. **9.** Mikholap P.V. Magnitno-abrazivnaya obrabotka naruzhnykh poverkhnostey trubchatykh izdeliy: avtoref. disP. na soiskanie nauchn. stepeni kand. tekhn. nauk: 05.03.01, 05.02.08 / P.V. Mikholap. – Minsk, 1992. – 20 P. **10.** Nizhnik P.N. Oborudovanie dlia magnitno-abrazivnoy obrabotki slozhnoga-sonnykh detaley GTD / P.N. Nizhnik, V.I. Kutsipak, V.A. Matyukhin, O.V. Pokatov, V.N. Fandeev // Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya, 2004, No 7 (15). С. 220-224. **11.** Sakulevich F.Yu. Osnovy magnitno-abrazivnoy obrabotki / F.Yu. Sakulevich – Minsk: Nauka i tekhnika, 1981. – 328 P. **12.** Skvorchevskiy N.Ya. Effektivnost' magnitno-abrazivnoy obrabotki/N.Ya. Skvorchevskiy, E.N. Fedorovich, P.I. Yashcheritsyn – Minsk: Navuka i tekhnika, 1991. – 215 P. **13.** Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ya. V 2-kh t. Vol. 2 /Pod red. A. G. Kosilovoy i R. K. Meshcheryakova. – 4-e izd., pere-

rab. i doP. – Moscow: Mashinostroenie, 1985. 496 P. **14.** Stepanov O.V. Issledovanie protsessa formirovaniya magnitno-abrazivnogo poroshkovogo instrumenta dlia obrabotki detaley slozhnoy formy: diP. ... kand. tekhn. nauk: 05.16.06/Stepanov Oleg Vasil'yevich. – Kiev, 1997. – 145 c. **15.** Tkachuk I.V. Formuvannia mahnitno-abrazivnogo instrumentu zi stabilnymy vlastyostiamy v robochykh zazorakh kiltsevooho typu dyP. ... kand. tekhn. nauk: 05.03.01. – Kiev, 2015. – 175 P. **17.** Khomich N. P. Magnitno-abrazivnaya obrabotka izdeliy: monogr. - Minsk: BNTU, 2006. - 218 P. **18.** Pat. 84464 Ukraina V24V 31/112 (2006.01). Mahnitna sistema dlia ob'iemnoi obrobky feromahnitnymy poroshkami / V.M. Geichuk, V.P. Maiboroda; zaiavnyk ta patentovlasnyk. Natsionalnyi tekhnichniy universytet Ukrainy "KPI". a200611768; zaiavl. 08.11.2006; opubl. 27.10.2008; biul. № 20. **19.** Byelzaev O. Erhöhung der Leistungsfähigkeit von HSS-Spiralbohrern durch Einsatz der magnetabrasiven Bearbeitung//Dissertation. - 2008. Magdeburg. **20.** <http://www.magnetfinish.com>. **21.** <http://www.festo.com>.

Поступила (received) 10.10.2015

Гейчук Владимир Николаевич – доктор технических наук, Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт", доцент, профессор кафедры "Конструирование станков и машин"; адрес: 03056, г. Киев, пр. Победы, 37, корп. 1, к. 230 ; тел.: 067-436-98-44; e-mail: geychukw@mail.ru; poroshinw@gmail.com.

Geichuk Volodymyr – Doctor of Technical Sciences, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", associate professor, professor of the department "Construction machinery and vehicles"; Address 03056, Kyiv, Pr. Victory, 37, Bldg. 1, k. 230; tel.: 067-436-98-44; e-mail: geychukw@mail.ru; poroshinw@gmail.com.

Мосейчук Виктор Алексеевич – инженер, частное предприятие "Киев Гидропривод"; адрес: 04136, Киев, ул. Северо-Сырещкая, 3; тел.: 067-935-95-35; e-mail: victor_mvva@meta.ua.

Moseichuk Viktor – Engineer, the Private Enterprise "Kyiv Hidropryvod"; Address: 04136, Kyiv, Pivnichno-Syretska Street, 3; tel.: 067-935-95-35; e-mail: victor_mvva@meta.ua.

УДК 621.039.57

С.С. ДОБРОТВОРСКИЙ, Б.А. АЛЕКСЕНКО, Л.Г. ДОБРОВОЛЬСКАЯ

ПОЛУЧЕНИЕ НАНО- И СУБМИКРОСТРУКТУР ПРИ ДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА РИ ИЗ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

Проведено практическое экспериментальное исследование влияния качества сжатого воздуха, используемого для формирования плазменной струи в процессе плазменного резания стали с применением неактивного газа. В связи с широким распространением технологии плазменной резки в современном промышленном производстве указанная технология нуждается в совершенствовании с целью повышения качества производимой продукции и снижения производственных затрат предприятия. Результат исследования показал необходимость применения адсорбционных осушителей в процессе подготовки воздуха для аппаратов плазменной резки.

Ключевые слова: плазменная резка, осушитель, сжатый воздух, влагосодержание, адсорбция, регенерация.

Введение. Сжатый воздух получает все большее распространение в промышленности как источник энергии, являясь одним из основных источников энергии на большинстве промышленных предприятий.

В настоящей публикации применение сжатого воздуха будет рассмотрено с позиции его непосредственного участия в технологическом процессе плазменной резки.

Анализ последних исследований и литературы. Обзор работ и исследований по поставленной тематике свидетельствует о том, что основное внимание разработчиков и производителей оборудования плазменной резки уделяется проблеме подбора параметров источника тока и разработкам, посвященным выбору материалов, используемых при производстве режущих сопел. При этом, проблеме очистки и осушки сжатого воздуха, используемого при создании плазменной струи уделяется недостаточно внимания, как в области теоретических исследований, так и на практике.

Целью данной статьи является изучение характера влияния параметров сжатого воздуха, используемого в процессе плазменной резки стали, в частности, такого параметра как влагосодержание, на качество реза, производимого плазменным оборудованием.

Постановка проблемы. В настоящей работе была рассмотрена проблема подготовки воздуха для аппаратов плазменной резки, показана необходимость применения для этих целей осушителей адсорбционного типа, экспериментально была прослежена зависимость качества реза от влажности подводимого сжатого воздуха на аппарате плазменной резки, с техническими характеристиками, соответствующими условиям проведения эксперимента (см. табл. 1.), а также указаны основные требования, предъявляемые к адсорбционным осушителям, используемым для обеспечения воздухом аппаратов плазменной резки.

Материалы исследований. Качество работы аппарата плазменной резки можно оценить по таким параметрам как скорость и чистота реза, скос кромки реза, значение минимального размера точки входа.

Угол скоса кромки и размер точки входа являются определяющими при раскрое разрезаемой заготовки, позволяя значительно экономить обрабатываемый материал, особенно при большой (10 ... 40 мм) тол-

щине разрезаемой заготовки и вариантах раскроя с большим количеством «вложенных» деталей.

На практическом примере раскроя заготовок под фланцы согласно ГОСТ 12820-80 (стандарт распространяется на стальные приварные плоские фланцы для соединительных частей и трубопроводов, таким образом, можно справедливо считать данные изделия одними из наиболее распространенных, по меньшей мере, в котельном оборудовании) возможно проследить важность упомянутых параметров резания.

Так, при диаметре внутреннем фланца 1-125-10, равном 135 мм и диаметре внешнем фланца 1-25-10, равном 115 мм, расстояние между заготовками при симметричном позиционировании вложения составляет $(135-115)/2=10$ мм. Если принять толщину реза равной 5 мм, то максимально допустимый скос кромки реза при раскрое листа толщиной (согласно ГОСТ 12820-80) 25 мм не может превышать 6° , поскольку в противном случае чистовая токарная обработка заготовок не перекроет зарезы, оставленные на заготовке плазменной струей (рис. 1).

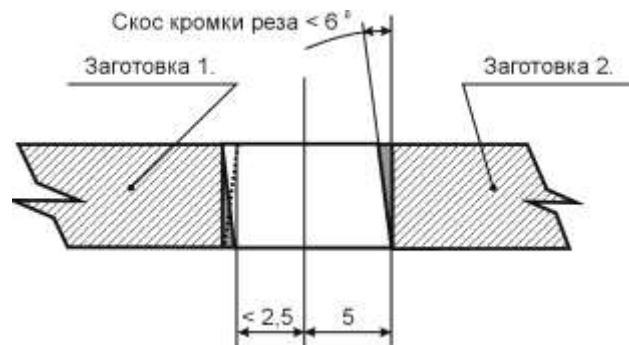


Рис. 1 – Скос кромки плазменного реза

Также следует учитывать, что точка входа плазменной струи превышает размерами толщину реза в 1,5 ... 2 раза, поэтому современные аппараты плазменной резки, как правило, не разрешают симметричное позиционирование вложения так, как описано в приведенном примере: учитывая необходимость врезки, программа-раскройщик принудительно смещает «вложенную» деталь, увеличивая, тем самым, расстояние между заготовками в точке врезки и, соответственно, сближая детали на 5 ... 10 мм по оси распо-

ложения врезки. Таким образом, при принятой ранее толщине реза, равной 5 мм, наклон плазменной струи не допускается вовсе, а скос кромки обрезаемой детали (даже принимая во внимание последующее снятие фасок в процессе чистовой токарной обработки заготовок) не должен превышать 1° .

Получить такие четкие характеристики плазменной резки на практике очень сложно, при этом следует учитывать все факторы, влияющие на качество реза, подбирать и четко выдерживать все параметры работы оборудования. И если выбор таких параметров, как напряжение и сила тока резания, может осуществляться персоналом в широких пределах и оперативно подстраиваться оборудованием автоматически, то качество воздуха возможно улучшить только лишь путем доукомплектования установки плазменной резки специальным оборудованием воздухоподготовки.

Таким образом, игнорирование требований к качеству воздуха и неиспользование оборудования его подготовки, в приведенном примере, может существенно увеличить затраты предприятия, увеличив отход материала и приведя к необходимости приобретения дополнительного материала специально под изготовление фланцев меньшего типоразмера.

Практическое же использование аппаратов плазменной резки в местных условиях эксплуатации свидетельствует о том, что проблеме подготовки воздуха уделяется недостаточно внимания.

При отработке технологии авторам приходилось сталкиваться с такими ситуациями, когда в шланге плазмореза наблюдалось накопление ливневой влаги. Такое обильное конденсирование жидкости сопровождается характерными звуками в сопле и приводит к резкому ухудшению качества реза, вплоть до срыва плазменной струи. Обслуживающий персонал отечественных предприятий научился бороться с указанной проблемой, применяя недорогие фильтры, в том числе изделия бытового назначения и конструкции собственного производства. Такие меры способны обеспечить принципиальную работоспособность резака, но лишь при условии его эксплуатации в летний период или в хорошо отапливаемом помещении, при этом вопрос о качестве реза вообще не ставится.

В тех случаях, когда предприятие эксплуатирует свое плазменное оборудование в штатных режимах, обращая внимание на качество выпускаемой продукции и стремясь реализовать все возможности оборудования плазменной резки в полном объеме, оно неизбежно приходит к выводу о невозможности качественно подготовить воздух с использованием исключительно фильтрующих технологий или рефрижераторных осушителей. Так, при выходе из сопла воздуха, подготовленного даже по 4 ... 5 классу загрязненности, неизбежно происходит образование влаги из-за разницы давления в сопле и последующего доохлаждения воздуха на его выходе. Практикой действительно подтверждается, что на выходе из сопла даже хорошо отфильтрованного воздуха будет образовываться влага.

Следует также отметить то, что качественная подготовка воздуха на несколько процентов повыша-

ет скорость резания. Это не является определяющим фактором, однако, при интенсивном использовании предприятием оборудования плазменной резки, способно принести ощутимый экономический эффект.

На необходимости применения осушителей, способных очищать воздух до 1 ... 2 классов загрязненности настаивают и производители аппаратов плазменной резки. Как пример, можно привести фрагмент публикации фирмы Thermal Dynamics о повышении срока службы расходных деталей в части, касающейся качества газов:

Производители часто рекомендуют использовать для плазменной резки "Сухой и Чистый" газ. Посторонние загрязняющие вещества могут снизить эффективность резки так как критически важные газовые каналы будут засорены. Эти каналы существуют в соплах и в "завихрителях газа" и они имеют одно из ключевых значений для рабочих характеристик плазменной системы.

Если подаваемый газ влажный или "мокрый", то это приводит к появлению загрязняющих веществ на поверхностях расходных деталей. Это вызвано тем, что вода под воздействием высокой температуры испаряется и оставляет отложения. Обычно Вы можете найти это на электроде и на внутренней поверхности сопла. Вред наносимый влагой в первоначальный момент, появляется на электроде в насечках для "завихрения" газа. В дальнейшем, при эксплуатации, электрод покрывается черным налетом и в конечном итоге производительность будет снижена. Когда это произойдет, расходные детали должны быть заменены.

Таким образом, можно сделать вывод, что износ указанных комплектующих частей ускоряется не только и не столько по причине низкой квалификации персонала или резки толстых листов металла с использованием интенсивных режимов, сколько из-за повышенной влажности плазмообразующего воздуха.

Однако, как было показано на конкретном примере раскроя заготовок для изготовления фланцев, основная функция устройства осушки воздуха – это не только и не столько снижение износа комплектующих, сколько кардинальное повышение качества реза, что дает, в ряде случаев, колоссальную экономию материала и значительный рост производительности режущего оборудования.

Учитывая вышесказанное, в процессе экспериментального исследования влияния влажности

сжатого воздуха на качество реза было принято решение об использовании в качестве устройства подготовки воздуха осушителя адсорбционного типа, способного обеспечить воздухоподготовку до 1 класса по DIN ISO 8573-1. При этом, с целью обеспечения возможности получения экспериментальных данных, адсорбер осушителя был укомплектован блоком управления ТДС-5, позволяющим варьировать влажность сжатого воздуха на входе в аппарат плазменной резки в пределах $10,0 \dots 0,003 \text{ г/м}^3$, что соответствует температуре точки росы в рамках от $+10^{\circ} \text{ С}$ до -70° С и, соответственно, классам загрязненности от 6 до 1 (см. табл. 1.).

Таблица 1 – Влажность согласно классов загрязненности

Класс очистки	Максимальное остаточное содержание влаги	
	г/м ³	точка росы сжатого воздуха, °С
1	0,003	-70
2	0,117	-40
3	0,88	-20
4	5,953	+3
5	7,732	+7
6	9,356	+10

В качестве обрабатываемого материала был использован лист металла 1500 x 4000 x 16, сталь 3. Согласно раскрой (см. рис. 2.), было выполнено 159,2 м погонных реза с 442 точками врезки, при различных параметрах влажности подаваемого сжатого воздуха (см. табл. 2.).

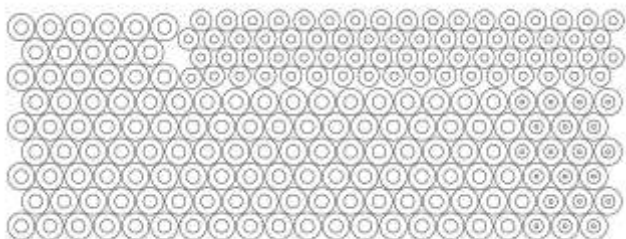
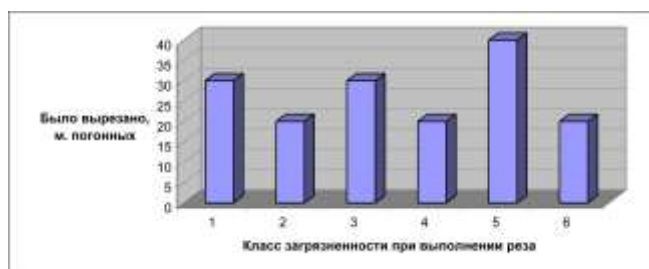


Рис. 2– Раскрой листа металла в ходе выполнения экспериментальной резки

Таблица 2 – Длины выполненных резов при заданном классе загрязненности



Прочие параметры резания были выбраны ПО оборудования автоматически и в ходе эксперимента не изменялись. Экспериментально проследить зависимость изменения скорости реза от параметров сжатого воздуха, по условиям проведения описываемого эксперимента, также технической возможности не представлялось.

Результаты исследования. В результате проведенного эксперимента была прослежена зависимость изменения угла скоса кромки реза от влажности подаваемого сжатого воздуха, отображенная на графике (см. рис. 3.).

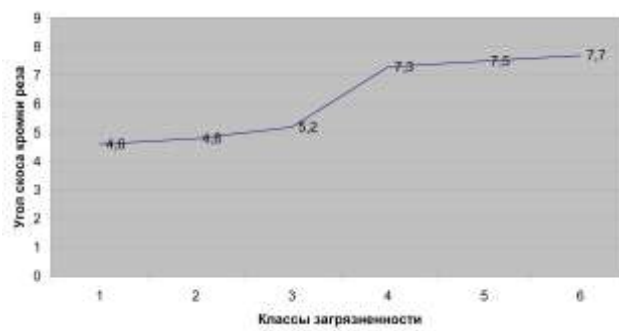


Рис. 3. Зависимость угла скоса кромки реза от класса загрязненности используемого воздуха.

Оценка зависимости угла скоса кромки реза от влажности подаваемого сжатого воздуха проводилась в процессе чистовой токарной обработки изделий. При этом, скос кромки определялся из значения максимальной конусности круглого реза, рассчитывавшегося, в свою очередь, как разность координаты положения касания резцом заготовки и положения резца, при котором на поверхности заготовки наблюдалось полное отсутствие следов плазменной резки (по условиям эксперимента вырезались детали цилиндрической формы, см. рис. 2.). Угол скоса кромки реза в градусах определялся по значению тангенса полученного соотношения хода резца к толщине разрезаемой заготовки (16 мм).

На приведенном графике зависимости угла скоса кромки реза от влажности используемого воздуха (см. рис. 3.) представлены усредненные значения полученных данных.

Заметное резкое повышение качества реза при переходе с 4 к 3 классу загрязненности, (см. рис. 3.) авторами объясняется как возможной погрешностью эксперимента, так и значительным изменением влажности содержания (с 5,953 до 0,88 г/м³) при снижении влажности с температуры точки росы +3 до -20⁰ С.

В результате имеющегося опыта можно констатировать тенденцию повышения качества реза оборудованием плазменной резки при снижении влажности подаваемого сжатого воздуха и сделать вывод, что оборудование плазменной резки нуждается в воздухе с большей степенью очистки, чем та, которую способны обеспечить простые устройства воздухоподготовки типа циклонных очистителей и фильтров. К такому оборудованию относятся, как было показано выше, аппараты ручной и автоматической плазменной резки.

В указанных случаях требуется использование осушителей именно адсорбционного типа, способных обеспечить снижение точки росы до -70⁰ С.

Практические разработки. Технология глубокой осушки воздуха с применением эффекта адсорбции влаги поверхностным слоем гранулированного мелкопористого адсорбирующего материала широко применяется в промышленности и по эффективности превосходит технологию доохлаждения осушаемого газа с использованием рефрижераторных охладите-

лей, способную обеспечить лишь 4-й класс загрязненности по остаточному содержанию влаги.

По принципу работы адсорбционные осушители подразделяются на установки, использующие принцип короткоциклового безнагревной адсорбции (КБА) и установки с горячей регенерацией адсорбента. Осушители, функционирующие по принципу короткоциклового безнагревной адсорбции, получили распространение как более простые, недорогие и надежные, в отличие от сложных и дорогих осушителей с горячей регенерацией.

Процесс глубокого осушения (до значения температуры точки росы -70°C) происходит с потерей энергии. Так, потери установок КБА составляют до 20 % осушаемого сжатого воздуха, а дорогостоящие установки с горячей регенерацией потребляют помимо сжатого воздуха и значительное количество электроэнергии, большая часть которой, фактически, расходуется на нагрев окружающей среды.

На рынке имеются различные типы устройств воздухоподготовки, причем применение дорогостоящих импортных устройств не гарантирует эффективного решения проблемы подготовки воздуха. Так, приобретение предприятием устройства воздухоподготовки даже зарекомендовавшей себя солидной марки не гарантирует эффективной работы данного устройства в конкретных условиях эксплуатации. Это вызвано прежде всего особенностями выходных параметров компрессорных станций, отличиями в конструкции отечественных воздухопроводов, недостаточно корректной эксплуатацией устройств воздухоподготовки и систем дренирования рабочим персоналом.

Особенностью эксплуатации устройств плазменной резки является непостоянство расхода сжатого воздуха, обусловленное необходимостью периодических отключений для установки разрезаемого листа и снятия готовых заготовок, существенным различием траекторий движения резака, толщиной обрабатываемых материалов и т. д. Поэтому вполне естественным является желание предприятий, эксплуатирующих плазменные резаки, снабдить свое оборудование осушителями, способными максимально гибко и оперативно подстраиваться под конкретные условия энергопотребления, обеспечивая в нужный момент времени требуемый расход воздуха на данном потребителе.

Учитывая указанное требование, авторами были разработаны и внедрены адсорбционные осушители типа ТДС, особенностью которых является то, что режим работы ТДС может изменяться встроенным активным измерителем влажности по оригинальному алгоритму, что позволяет как задавать требуемую глубину осушки (к примеру, от 0 до -10°C в летний период и от -20°C до -70°C в зимний), так и максимально быстро и без участия обслуживающего персонала реагировать на изменения расхода на потребителя сжатого воздуха. В случае временного прекращения потребления на выходе, осушитель ТДС автоматически переходит в режим задержки потребления, прекращая потерю сжатого воздуха на регенерацию, что значительно снижает непроизводительные потери сжатого воздуха.

Также к требованиям, предъявляемым к осушителям, снабжающим воздухом оборудование плазменной резки, можно отнести ограничения по габаритам и весу адсорбционных установок, что особенно актуально для случаев, когда установка плазменной резки представляет собой агрегат (тем более, мобильный), включающий в себя помимо непосредственно источника электрического тока, также и воздушный компрессор с устройствами воздухоподготовки.

К сожалению, в настоящее время в мировой практике неизвестны конструкции адсорбционных осушителей, позволяющие добиться заметного уменьшения габаритов и снижения веса изделия, по сравнению с осушителями общепринятой конструкции. Поскольку адсорберы, в большинстве случаев, представляют собой стационарное оборудование, вопрос о повышении мобильности этих устройств не являлся центральным в процессе рассмотрения путей совершенствования конструкции данного типа оборудования. Тем не менее, столкнувшись с необходимостью готовить качественный воздух для мобильных потребителей, в частности, передвижных устройств плазменной резки, авторами были намечены пути повышения интенсивности работы адсорбционных осушителей при сохранении их массо-габаритных характеристик.

Адсорбционный осушитель, независимо от типа регенерации, функционирует циклически, при этом процесс включает в себя как этап собственно адсорбции (рабочий), так и этап регенерации адсорбирующего вещества (вспомогательный), эффективность которого оказывает значительное влияние на производительность адсорбционного осушителя. В практике постройки адсорбционных осушителей используются методы удаления влаги из адсорбента (просушки) путем обдува его предварительно нагретым, либо предварительно осушенным воздухом. При этом энергия, необходимая для осуществления процесса регенерации тратится на повышение влагоёмкости продувочного воздуха и, практически, технологически ограничена и не может быть значительно увеличена с целью интенсификации процесса регенерации.

Таким образом, с целью повышения эффективности работы адсорбционных осушителей, снижения их веса и уменьшения размеров, в том числе, для использования в мобильных агрегатах, потребовалось увеличить интенсивность регенерации заданного объема адсорбирующего вещества путем внесения дополнительных видов энергии на этапе регенерации. Работы в этом направлении носят экспериментальный характер и осушители компактной конструкции в настоящее время на отечественных производственных предприятиях не внедряются.

Еще одним требованием, предъявляемым оборудованием плазменной резки с ЧПУ, является повышенная надежность оборудования воздухоподготовки, что вызвано невозможностью программы повторного стартовать и продолжить рез с координаты аварийной остановки сопла. Таким образом, аварийная остановка приводит к неизбежной порче заготовки и необходимости приобретения дополнительной партии обрабатываемого материала.

В целях повышения надежности производимых осушителей ТДС, авторами был разработан и внедрен комплекс мер по обеспечению безотказности конструкции, включая снижение чувствительности осушителя к несоответствию входных параметров воздуха и электропитания необходимым и к случаям некорректного обслуживания оборудования персоналом. Также в конструкции осушителей ТДС был впервые использован принцип полистабильности управляющей системы с применением кватростабильного электропневмодрайвера, физически исключая такое положение арматуры осушителя, при котором потребление на осушителя может быть прекращено, даже в случае отключения осушителя от источника электропитания.

Таблица 3 – Параметры установки плазменной резки, использованной при проведении эксперимента

Параметр	Значение
Перемещение сопла max, мм -продольное -поперечное	6080 1520
Пределы подач, мм -продольный -поперечный	0 ... 6500 0 ... 6500
Размер заготовки max, мм	1500 ... 6000
Точность поверхности по ГОСТ 14792-80	2 – 3 кл.
Точность позиционирования, мм	0,1
Размер выреза, min	10
Точность воспроизведения контура по ГОСТ 5614-74	+/- 0,35
Источник плазмы	Инверторный 140 А. Режим ПВ 100 %
Толщина max разрезаемой заготовки, мм	35
Тип разрезаемого материала: углеродистые, легированные и специальные стали, в т. ч. нержавеющие, цветные металлы.	

Выводы. Процесс плазменной резки получает все более широкое распространение и интенсивно

внедряется на машиностроительных предприятиях, заменяя собой механическое резание, по причине множества явных и неоспоримых преимуществ, таких, как возможность резания деталей со сложной геометрической формой, высокое качество поверхности реза, невысокая температура нагрева разрезаемой заготовки, исключая деформацию заготовки и закалку кромки реза, безопасность процесса резания, высокая скорость резания, возможность обработки любых металлов, в том числе цветных и тугоплавких, сравнительная легкость автоматизации процесса резания. При этом установлено, что плазменное оборудование предъявляет ряд специфических требований, в том числе, к качеству сжатого воздуха, используемого для получения плазменной струи и, соответственно, к оборудованию воздухоподготовки, анализу которых и посвящена настоящая статья. Результат приведенного исследования показал необходимость применения осушителей адсорбционного типа в процессе подготовки воздуха для аппаратов плазменной резки.

Список литературы: 1. Добротворский С.С. Повышение конкурентоспособности отечественного машиностроительного производства в современных условиях // С.С. Добротворский, Е.В. Басова, Л.Г. Добровольская, А.К. Мялица // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ": Технологии в машиностроении. Х.: НТУ «ХПИ», 2014. – Вып.5542. – С. 25-31. 2. Быховский Д. Г. Плазменная резка. Л.: Машиностроение, 2001. С. 83. 3. Ширшов И. Г., Котиков В. Н. Плазменная резка. М.: Машиностроение, 1987. С. 198. 4. Мельгунов, М.С. Короткоцикловая безнагревная адсорбция / М.С. Мельгунов // Промышленный катализ в лекциях / под общ. ред. А.С. Носкова. – М.: 2009. – Вып. 8. – С. 62–105.

Bibliography (transliterated): 1. Dobrotvorskiy P.P., Basova E.V., Dobrovol'skaja L.G., Mjalica A.K. Povyshenie konkurentosposobnosti otechestvennogo mashinostroitel'nogo proizvo-dstva v sovremennykh usloviyah. Kharkov: NTU «KhPI», 2014. Print. 2. Plazmennaya rezka metalla [WWW resource]. URL: <http://плазмарез.рф/?p=70> (Date of visit site: 28.09.2015). 3. Thermal Dynamics Operator's Ready Reference [WWW resource]. URL: http://www.thermal-dynamicP.com/literature/operators_reference/63-2823.pdf (Date of visit site: 28.09.2015).

Поступила (received) 12.10.2015

Добротворский Сергей Семенович – док. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ», тел.: (057)-720-66-25, e-mail: sdobro@mail.ru;

Dobrotvorskiy Serhei Semenovich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25, e-mail: sdobro@mail.ru;

Алексенко Борис Александрович – аспирант НТУ «ХПИ» тел.: (057)-720-66-25 e-mail: commerage@list.ru;

Aleksenko Borys Aleksandrovych – graduate student, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25, e-mail: commerage@list.ru;

Добровольская Людмила Георгиевна – канд. техн. наук, доцент НТУ «ХПИ» тел.: (057)-720-66-25.

Dobrovolskaia Liudmyla Heorhyevna – Candidate of Technical Sciences, Docent, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25.

УДК 621.9.06-9.11

В.Б. СТРУТИНСЬКИЙ, В.М. ЧУПРИНА, О.Я. ЮРЧИШИН**ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ МЕТАЛОРИЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ НА ОСНОВІ ЧИСЕЛЬНИХ РОЗРАХУНКІВ ЕЛІПСОЇДІВ ЖОРСТКОСТІ**

На основі тензорно-геометричного підходу до опису жорсткості основних підсистем верстату складено модель просторової жорсткості його пружної системи. Розроблено алгоритм знаходження статичної жорсткості (податливості) верстату в довільному напрямку тривимірного простору і побудовано поверхні статичної жорсткості.

Ключевые слова: металорізальний верстат, пружна система, підсистема, жорсткість, тензор, просторова модель

Інтенсифікація процесу обробки в сучасних технологічних процесах вимагає забезпечення високої жорсткості металорізальних верстатів, яка безпосередньо пов'язана з точністю обробки. Це проявляється у вигляді нерівномірної жорсткості верстата в робочому просторі – анізотропії жорсткості, яка впливає на точність обробки і появу відхилень від ідеальної геометричної форми оброблюваних деталей. Як наслідок на деталі збільшуються макро- і мікропохибки у вигляді викривлення форми деталей (еліпсність, овальність, огранка, конусність і інше), а також погіршується шорсткість їх поверхонь. Тому дослідження жорсткості металорізальних верстатів є актуальним питанням.

Проблема в загальному вигляді полягає у підвищенні точності металорізальних верстатів.

Дослідження в даному напрямку проведені значним числом авторів. В фундаментальних роботах Д.М.Решетова, З.І.Левіної, В.Е.Пуша [5-7] теоретично обґрунтований зв'язок показників точності обробки деталей на верстаті з характеристиками жорсткості верстата і його вузлів. Показаний вплив жорсткості верстата на показники його точності, зокрема жорсткості окремих вузлів на баланс геометричної точності верстата.

В монографії В.О.Кудинова [1] показана роль статичної і динамічної жорсткості верстатів і їх вузлів, на точність обробки. Введено поняття еліпсів жорсткості (супортних груп, шпindelних вузлів і інших). Визначені причини втрати стійкості, виникнення автоколивань і вібрацій при різанні і викликані ними похибки обробки у вигляді порушення геометрії деталей (еліпсність, огранка, хвилястість) та погіршення шорсткості оброблених поверхонь.

В роботі Ю.В.Подураєва [2] на основі тензорно-геометричного уявлення про структуру оброблюваної машини (промислового робота, верстата) введено поняття різних еліпсоїдів мехатронної машини – кінематики, жорсткості, динаміки. Це є найбільш узагальнений підхід, тому що еліпсоїд відображає анізотропію параметрів машини не в окремій площині, а у тривимірному просторі (3D- просторі).

В роботах [3,4] розвинуто тензорно-математичний підхід до аналізу статичних і динамічних систем шляхом математичного моделювання.

В літературних джерелах не виявлено результатів розробки моделей просторової жорсткості мета-

лорізальних верстатів. Даній частині загальної проблеми і присвячена дана стаття.

В статті зроблена спроба розвинути проведені дослідження і на основі тензорно-геометричного підходу до опису жорсткості основних підсистем побудувати модель, яка відображає анізотропію жорсткості в робочій зоні металорізального верстата для подальшого аналізу точності обробки на верстаті.

Мета статті. Метою статті є розробка статичної тензорно-геометричної моделі просторової жорсткості верстату з урахуванням жорсткості його основних підсистем.

Для досягнення мети поставлені і вирішені задачі досліджень, які включають аналіз конструктивних схем металорізальних верстатів із введенням еліпсоїдів жорсткості, розробка методів побудови еліпсоїдів та визначення фактичних поверхонь жорсткості та деформативності.

Основна частина. Металорізальний верстат – це збірна механічна конструкція, яка складається з багатьох окремих елементів (вузлів, підвузлів та деталей). Відомо, що компоновки верстатів здебільшого нагадують профіль скоби [7]. При цьому на несучих елементах конструкції (станинах, стійках, порталах) базуються окремі підсистеми верстата (шпindelні групи, супортні групи, консольні чи хрестові столи і інші). Вони призначені для утримання кінцевих елементів пружної системи – деталі (заготовки) та різального інструменту.

Для аналізу жорсткості пружної системи (ПС) верстата скористасьмося діакоптичним підходом, зокрема поділом ПС на підсистеми, як це запропоновано в роботі [3].

Схема статичної моделі повної ПС верстата показана на рисунку 1-а.

В загальному випадку статична модель верстату може бути подана у вигляді багатьох складових підсистем, пов'язаних пружними в'язями. Зокрема в даній роботі – у вигляді трьох підсистем: інструмента (підсистема 1), деталі (підсистема 2) і несучої системи (підсистема 3).

Підсистема 3 практично не впливає на відносні переміщення між точками підсистем 1 і 2, які формують геометрію обробної деталі. Тому доцільно перейти до спрощеної моделі, схема якої показана на рисунку 1-б.

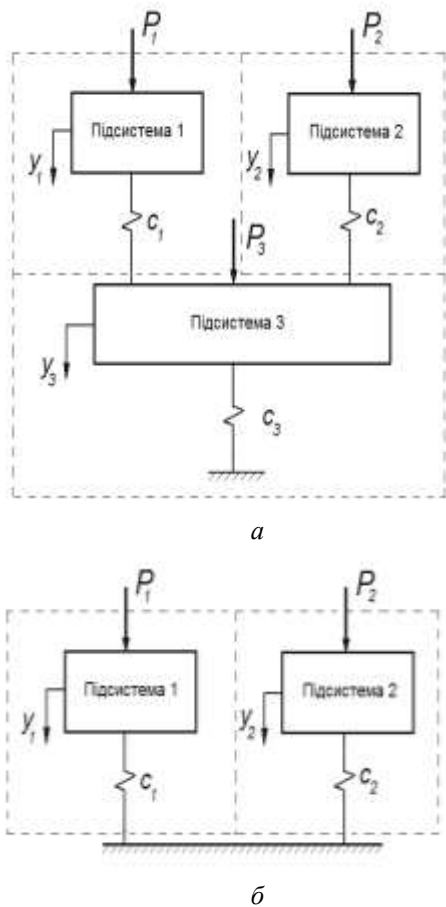


Рис. 1 – Схеми статичних моделей ПС верстата: а – повна модель; б – спрощена модель

Не зважаючи на спрощення, ця модель відображає основні закономірності формування траєкторії руху інструмента відносно деталі в процесі різання.

Кожна з цих підсистем має власну жорсткість. Ця жорсткість може бути приведена до кінцевого елемента (до зони різання) у вигляді еліпсоїда жорсткості. Таких підсистем у металорізальному верстаті налічується щонайменше дві, з яких одна пов'язана з інструментом, а інша – з заготовкою (обробною деталлю). Відповідно до кількості підсистем у верстаті існує як мінімум два еліпсоїди жорсткості – еліпсоїд жорсткості інструмента (ЕЖІ) та еліпсоїд жорсткості деталі (ЕЖД).

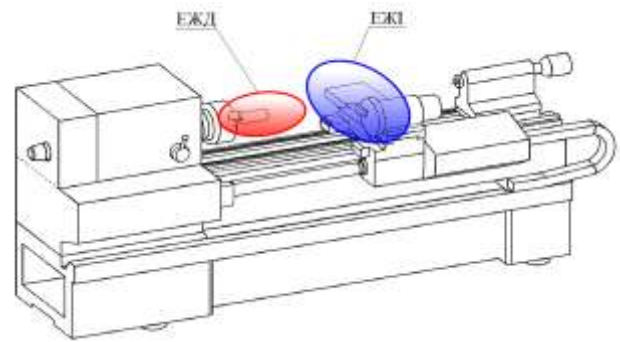
На рисунку 2 зображені приклади конструктивних схем верстатів різного технологічного призначення з еліпсоїдами жорсткості головних підсистем.

Кожному еліпсоїду жорсткості відповідає діагональна матриця жорсткості

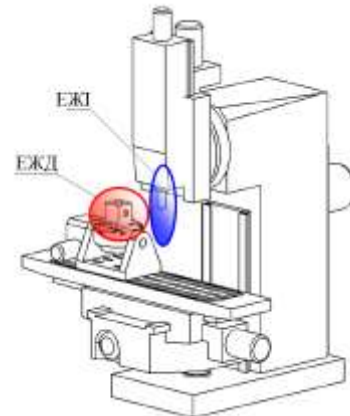
$$C = [c_{ij}] = \begin{bmatrix} c_{x0} & 0 & 0 \\ 0 & c_{y0} & 0 \\ 0 & 0 & c_{z0} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де c_{x0}, c_{y0}, c_{z0} - головні жорсткості підсистеми.

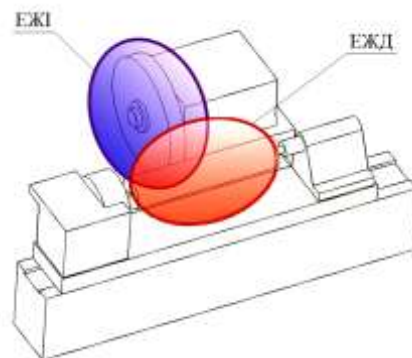
Або в такому вигляді



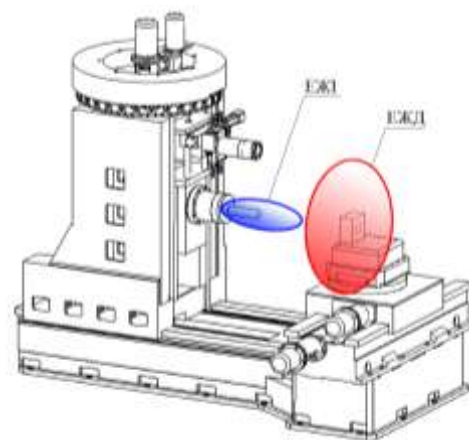
а



б



в



г

Рис. 2 – Еліпсоїди жорсткості інструмента (ЕЖІ) і деталі (ЕЖД) для верстатів різних технологічних груп: а – токарного; б – фрезерного; в – круглошліфувального; г – багатоопераційного

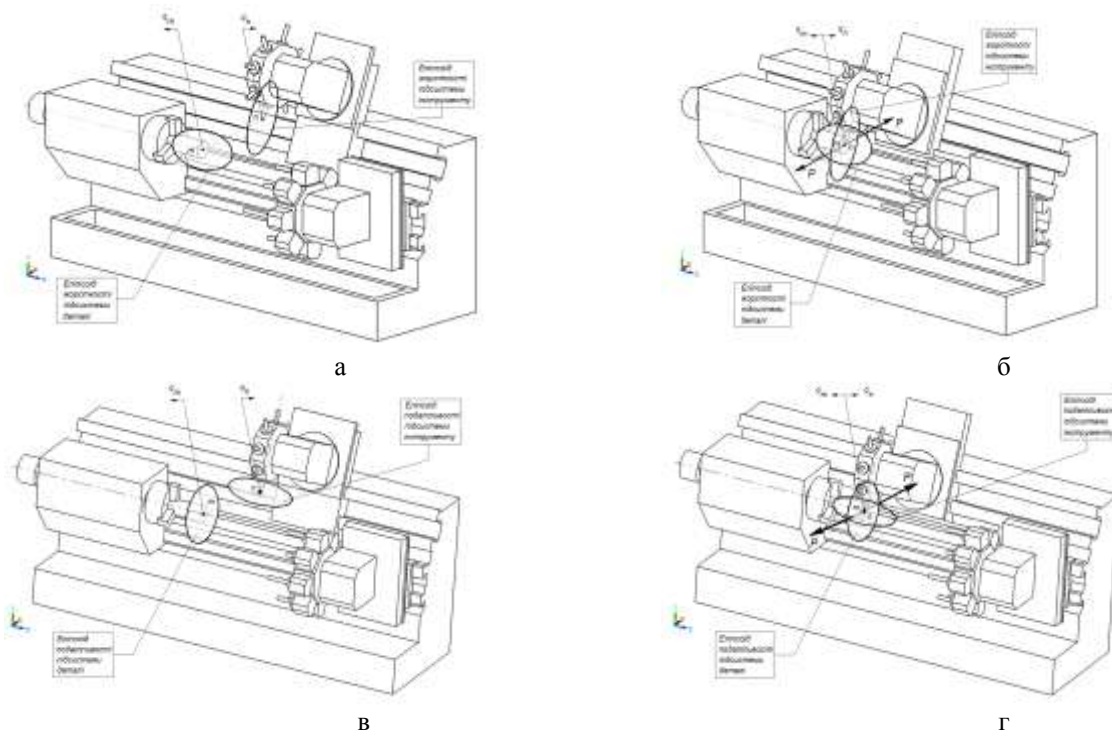


Рис. 3 – Конструктивні схеми ПС токарного верстату з еліпсоїдами жорсткості (а, б) та податливості (в, г): а, в - в неробочому стані; б, г - в робочому стані (при різанні)

$$[x \ y \ z] \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{c_{x0}^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{c_{y0}^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{c_{z0}^2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = 1. (2)$$

Розглянемо взаємодію двох підсистем (шпиндельної групи і поперечного супорту) токарного верстату, конструктивні схеми якого показані на рисунку 3.

Як показано на рисунку 3-а в неробочому стані верстата центри еліпсоїдів жорсткості розташовані в точках приведення жорсткостей (кінцевих точках) підсистем інструмента та деталі (відповідно n і m).

Під час різання на ПС верстата здійснюється навантаження силою різання P . Ця сила діє на інструмент в точці n , а її реакція – на деталь в точці m . В процесі обробки вершина інструменту входить в контакт із заготовкою. При обробленні заготовки різальним інструментом точки n і m зближуються, часто практично збігаються (рис.3-б).

Деформації елементів верстата під дією сил різання, які зумовлені кінцевою жорсткістю ПС, викликають появу в системі узагальнених координат переміщень q , причому як абсолютних переміщень точок q_n і q_m , так і відносних – $\Delta q = q_m - q_n$. Ці переміщення формують відхилення від ідеальної геометрії деталі, тобто похибки обробки (переважно в напрямку нормалі до оброблюваної поверхні). Щоб в процесі роботи верстата ці відхилення не переви-

щували встановлені допускові межі, необхідно забезпечити достатню жорсткість ПС верстата, причому як статичну, так і динамічну

При вирішенні просторово-деформаційних задач більш зручним є використання величин податливості ніж жорсткості.

Для трьох головних жорсткостей c_{x0}, c_{y0}, c_{z0} існують три зворотні величини – головні податливості $\delta_{x0}, \delta_{y0}, \delta_{z0}$ ШВ і, звичайно, інший еліпсоїд – еліпсоїд податливості.

Еліпсоїд податливості ШВ відображає зміну податливості ШВ в просторі, тобто розподіл величин податливості системи в різних напрямках робочого простору від центра еліпсоїда. Величина податливості визначається довжиною радіус-вектора еліпсоїда в заданому напрямку.

Еліпсоїд податливості математично описується формулами, аналогічними еліпсоїду жорсткості, тільки замість c використовується $1/\delta$.

На рисунку 2-в показана конструктивна схема ПС токарного верстату з еліпсоїдами податливості двох головних підсистем – інструмента і деталі (заготовки). Ці еліпсоїди є спряженими до відповідних еліпсоїдів жорсткості.

Під час різання на верстаті центри еліпсоїдів (точки n і m) також зближуються, як це показано на рисунку 2-г.

Для знаходження статичної податливості верстата в довільному напрямку (а потім і жорсткості системи) визначимо сумарну податливість системи через податливості складових підсистем інструмента і

деталі, а також опишемо відповідну їй поверхню статичної податливості.

Сила різання P та її реакція діють на точки n і m в протилежних напрямках. Тому відносно переміщення $\Delta q = q_m - q_n$ (в заданому напрямку) буде знаходити у вигляді алгебраїчної суми абсолютних переміщень точок n і m . Знайдемо його через податливості пружних підсистем в цих точках

$$\Delta q = P \cdot \delta_m - (-P) \cdot \delta_n = P \cdot (\delta_m + \delta_n). \quad (3)$$

Величина Δq – це фактично відтиснення інструменту від деталі у заданому напрямку, яке безпосередньо визначає точність обробки на верстаті.

З формули (3) випливає, що результуюча податливість ПС верстата у заданому напрямку дорівнює сумарній податливості інструмента і деталі в зоні різання, тобто $\delta = \delta_m + \delta_n$.

Таким чином результуючу поверхню податливості ПС можна побудувати за допомогою двох еліпсоїдів податливості, отриманих для точок n і m .

В будь-якому випадку ця поверхня вже не буде еліпсоїдом.

В деяких часткових випадках, тільки якщо головні осі еліпсоїдів співпадають і для обох виконується умова $c_{x_0} > c_{y_0} > c_{z_0}$, результуючу поверхню податливості ПС можна приблизно (з незначною похибкою) замінити поверхнею еліпсоїду податливості, яка описується рівнянням

$$(\delta_{x_{0n}} + \delta_{x_{0m}})^2 \cdot x_0^2 + (\delta_{y_{0n}} + \delta_{y_{0m}})^2 \cdot y_0^2 + (\delta_{z_{0n}} + \delta_{z_{0m}})^2 \cdot z_0^2 = 1. \quad (4)$$

В загальному ж випадку напрямки головних осей податливості не збігаються. При цьому форму результуючої поверхні можна отримати шляхом графічних побудов.

Алгоритм знаходження реальної результуючої поверхні запропоновано наступний:

1. Задаємо рівняння еліпсоїду податливості для підсистеми інструмента (точка n).

2. Визначаємо рівняння прямої лінії, яка проходить через центр еліпсоїда і задає напрямок визначення податливості.

3. Знаходимо координати точки перетину прямої з еліпсоїдом податливості (точка K).

4. Визначаємо величину податливості δ_n .

5. Повторюємо п.п. 1-4 для іншого еліпсоїда для підсистеми деталі (точка m) і визначаємо величину податливості δ_m .

6. Знаходимо сумарну податливість в цьому напрямку для всієї ПС за визначеними підсистемами.

При знаходженні точок на поверхнях еліпсоїдів напрямок задається нескінченною прямою L , яка записується у вигляді канонічного рівняння

$$\frac{x - x_0}{l} = \frac{y - y_0}{m} = \frac{z - z_0}{n}. \quad (5)$$

де l, m, n – напрямні коефіцієнти;

x_0, y_0, z_0 – координати точки, яка лежить на прямій.

Якщо точка на прямій співпадає з початком системи координат, то

$$\frac{x}{l} = \frac{y}{m} = \frac{z}{n}. \quad (6)$$

Також, пряму L можна задати як лінію перетину двох не компланарних площин у вигляді системи рівнянь

$$\begin{cases} A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0, \\ A_2x + B_2y + C_2z + D_2 = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Якщо площини проходять через початок системи координат, то $D_1 = D_2 = 0$

З рівняння (6) можна знайти коефіцієнти для системи (7):

$$A_1 = m; B_1 = -l; C_1 = 0; A_2 = n; B_2 = 0; C_2 = -l. \text{ Таким}$$

чином, координати точки K перетину еліпсоїда з прямою L (див.п.3 алгоритму) можна знайти з системи лінійно-квадратичних рівнянь виду

$$\begin{cases} A_1x + B_1y + C_1z = 0, \\ A_2x + B_2y + C_2z = 0, \\ a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + a_{33}z^2 + 2a_{12}xy + 2a_{23}yz + 2a_{13}xz + a_{44} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Тут два перших рівняння задають пряму, а третє належить поверхні еліпсоїда. Квадратичні рівняння мають два рішення, тому таких точок перетину на поверхні існує дві – K та K' . Їх координати симетричні відносно точки O завдяки центральній симетрії еліпсоїда.

Податливість підсистеми інструмента δ_n в даному напрямку знайдемо як довжину (модуль) радіус-вектора \vec{K} , проведеного з центра еліпсоїда в точку K

$$\delta_n = \left| \sqrt{(x_K^2 + y_K^2 + z_K^2)} \right|. \quad (9)$$

Замінивши третє рівняння системи (8) на рівняння для другого еліпсоїду, по аналогії отримаємо податливість підсистеми деталі δ_m .

Повну податливість ПС в цьому напрямку визначаємо як сумарну податливість, тобто $\delta_\Sigma = \delta_m + \delta_n$, або

$$\delta_\Sigma = \left| \sqrt{(x_{K_m}^2 + y_{K_m}^2 + z_{K_m}^2)} \right| + \left| \sqrt{(x_{K_n}^2 + y_{K_n}^2 + z_{K_n}^2)} \right| \quad (10)$$

Відкладаючи δ_Σ від центра O в даному напрямку, знаходимо точку на напрямній прямій. Сукупність точок визначає результуючу поверхню відносної податливості ПС.

Таким чином за даним алгоритмом можна побудувати результуючу поверхню статичної податливості пружної системи верстата в цілому.

На рисунку 4 показана побудова поверхні з двох еліпсоїдів за вищезазначеним алгоритмом. При цьому співвідношення півосей еліпсоїдів приймалось таким: для першого - 1:2:3, для другого - 1:3:2. Отримана результуюча поверхня зовсім не схожа на еліпсоїд. Вона відображає розподіл податливості ПС системи верстату в просторі.

На рисунку 5 приведені приклади поверхонь, отримані для різних варіантів співвідношення осей еліпсоїдів (в межах одного порядку). Як видно з наведених зображень форм поверхонь, просторова податливість ПС верстату в різних напрямках суттєво змінюється.

При деяких інших видах обробки (наприклад, при обробці фасонних поверхонь) головні осі еліпсоїдів

можуть бути не колінеарними. Вони можуть повертатись на різні кути, причому не тільки відносно глобальної координатної системи верстата, але й поміж собою. Особливо це розповсюджено у верстатах з поворотними головками, поворотними столами та 4-6 координатних верстатах з ЧПК і оброблювальних центрах.

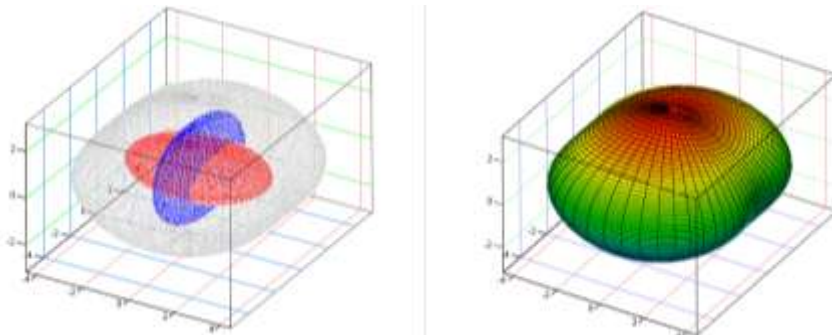


Рис. 4 – Побудова поверхні статичної податливості ПС верстату з двох еліпсоїдів

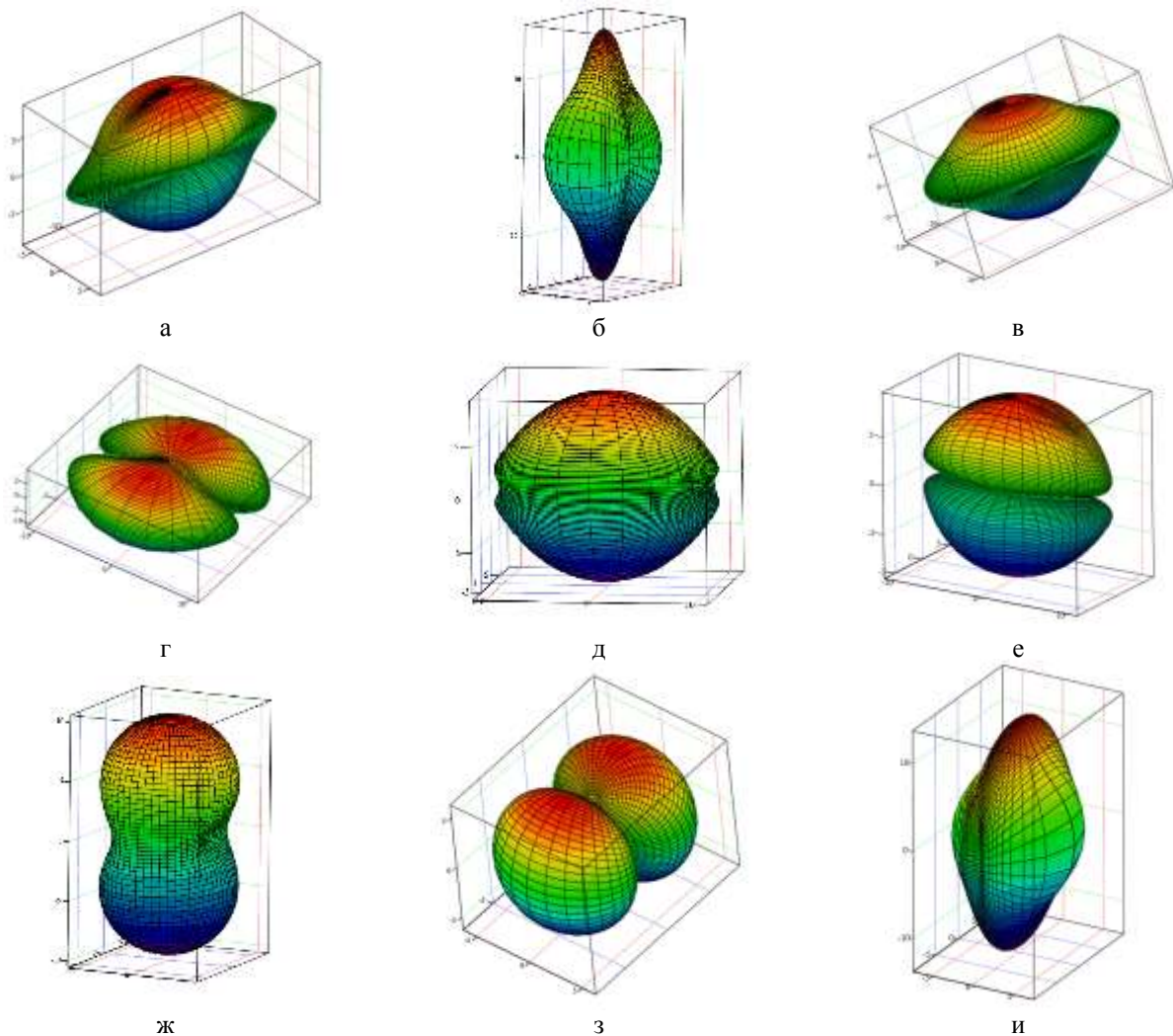


Рис. 5 – Поверхні податливості ПС верстата з різними співвідношеннями осей двох еліпсоїдів $a_1 : b_1 : c_1$ і $a_2 : b_2 : c_2$: а – 2:8:1 і 1:7:8; б – 2:1:8 і 1:7:8; в – 7:8:1 і 1:7:8; г – 7:2:1 і 1:7:2; д – 7:2:1 і 1:7:8; е – 7:2:1 і 1:7:8; ж – 2:1:2 і 1:4:8; з – 2:1:2 і 1:7:1; и – 1:7:8 і 6:1:5;

На рис. 6 наведений приклад вертикально-фрезерного верстату з ЧПК з додатковими поворотними координатами А і В. Допоміжний стіл може повертатись на кут α навкруги осі X, а поворотна шпіндельна головка – на кут β навкруги осі Y.

ного столу можна отримати також поворот на кут γ навкруги осі Z. Одночасно з цими вузлами відбувається поворот відповідних еліпсоїдів жорсткості (податливості) на ті ж самі кути.

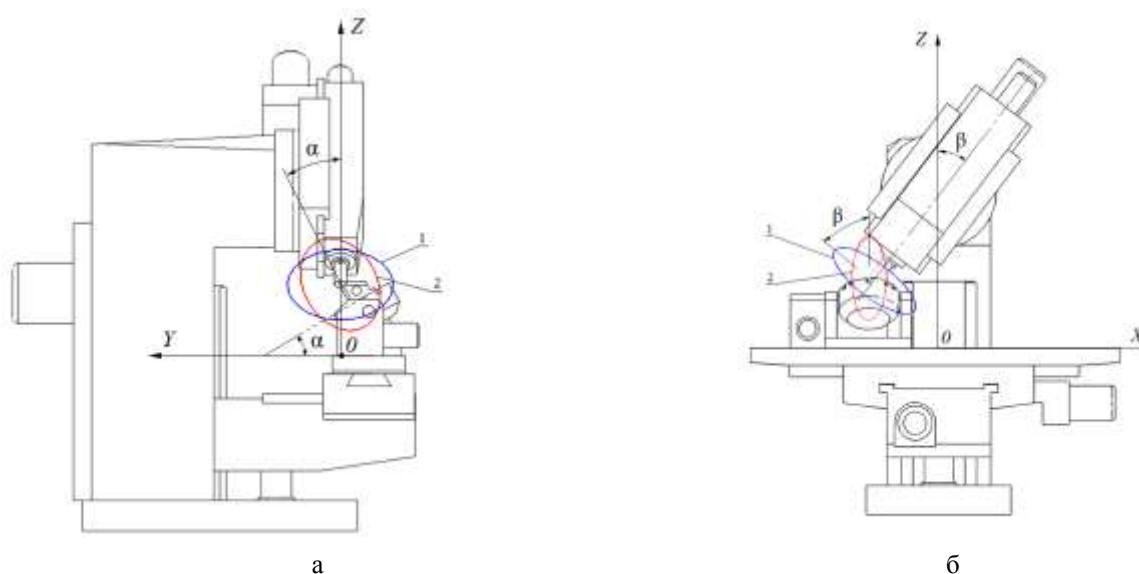


Рис. 6 – Розташування еліпсоїдів податливості інструмента (1) і деталі (2) на вертикально-фрезерному верстаті з поворотом осей на кути α і β : а, б – зона обробки в проекціях

В таких конструкціях верстатів задача побудови результуючої поверхні жорсткості (податливості) дещо ускладнюється, тому що в загальному випадку слід враховувати усі можливі додаткові кути поворотів.

На рисунку 6 показана побудова поверхні, яку можна отримати з двох еліпсоїдів з довільними незалежними поворотами осей обох еліпсоїдів на кути $\alpha_1; \beta_1; \gamma_1$ та $\alpha_2; \beta_2; \gamma_2$ відповідно. При цьому результуюча поверхня переорієнтується в просторі та змінюється по формі, причому іноді досить суттєво.

Анізотропія просторової жорсткості (податливості) пружної системи суттєво впливає на точність обробки на верстаті і сприяє появі макро- і мікро-

хибок на оброблюваній деталі. Побудована поверхня статичної податливості пружної системи верстата дозволяє визначати величини деформацій підсистем верстату від діючих силових навантажень і, як наслідок, знайти відтиснення інструменту від деталі в процесі різання, які обумовлюють точність обробки на верстаті - відхилення від ідеальних розмірів.

При зміні напрямку діючої сили змінюється величина відтиснення, яка визначає відхилення від ідеальної геометричної форми оброблюваних деталей. Таким чином, поверхня просторової жорсткості (податливості) пружної системи встановлює безпосередній зв'язок жорсткості (податливості) верстату з точністю обробки, зокрема значеннями отриманих розмірів і формою оброблюваних деталей.

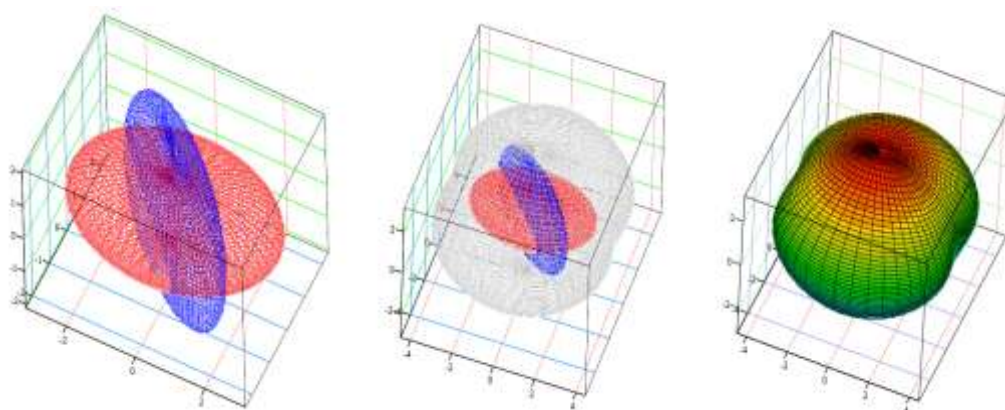


Рис. 7 – Побудова поверхні з двох еліпсоїдів з поворотом осей на кут 30°

Висновки

1. На основі тензорно-геометричного підходу до опису жорсткості головних підсистем верстату (інструмента і деталі) у вигляді еліпсоїдів жорсткості (податливості) складено статичну розрахункову модель пружної системи верстату для визначення його просторової жорсткості (податливості).

2. Розроблено алгоритм знаходження величини статичної жорсткості (податливості) в зоні різання верстату в довільному напрямку тривимірного простору.

3. Запропонована тензорно-геометрична модель просторової жорсткості у формі 3D-поверхні дає можливість визначення величини жорсткості (податливості) в будь-якому напрямку робочого простору верстату.

4. На основі побудованої 3D-поверхні знайдено величину деформації верстату в зоні різання та її залежність від діючого навантаження, зокрема відтиснення інструмента від деталі, яке безпосередньо впливає на точність обробки – розміри і форму деталі. Таким чином, встановлено зв'язок просторової жорсткості (податливості) верстату з точністю обробки на верстаті та надані рекомендації по підвищенню точності.

5. Як напрямок подальших досліджень рекомендується експериментальне визначення еліпсоїдів жорсткості та деформативності окремих вузлів металорізальних верстатів.

Список літератури: 1. Кудинов В.А. Динамика станков. / В.А.Кудинов – М.: Машиностроение, 1967 – 360 с. 2. Подураев

Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение: учебн. пос. для вузов. / Ю.В. Подураев – М.: Машиностроение, 2006. – 256 с. 3. Струтинський В.Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки: підручник. / В.Б. Струтинський – Житомир, ЖІТІ, 2001– 612 с. 4. Струтинський В.Б. Тензорні математичні моделі процесів та систем: Підручник. / В.Б. Струтинський – Житомир: ЖДТУ, 2005. – 635 с. 5. Детали и механизмы металлорежущих станков. В 2-х т. Под ред. Решетова Д.Н. Издательство: Машиностроение, 1972. 6. Левина З.М., Решетов Д.Н. Контактная жесткость машин / З.М. Левина, Д.Н. Решетов – М.: Машиностроение, 1971. – 264 с. 7. Пуш В.Э. Конструирование металлорежущих станков / В.Э.Пуш – М.: Машиностроение, 1977. — 390 с. 8. Струтинський В.Б. Обладнання для високочастотної вібраційної обробки деталей мікрорізанням з формуванням спеціального мікропрофілю / В.Б. Струтинський, І.В. Перфілов / Вісник національного технічного університету «ХПІ». 3б.наук.праць. Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ». 2015. - №4. – С. 23-27.

Bibliography (transliterated): 1. *Kudinov V.A.* Dynamics machines – Moscow: Mashinostroenie, 1967 – 360 P. 2. *Poduraev Ju.V.* Mechatronics: Fundamentals, Methods, Application P. – Moscow: Mashinostroenie, 2006. – 256 P. 3. *Strutinskij V.B.* Mathematical modeling of processes and systems mechanic P. – Zhitomir, ZhITI, 2001.– 612 p. 4. *Strutinskij V.B.* Tensor mathematical models of processes and system P. – Zhitomir: ZhDTU, 2005. – 635 P. 5. *Details and mechanisms of machine tool P.* Pod red. Reshetova D.N. Moscow: Mashinostroenie, 1972. 6. *Levina Z.M., Reshetov D.N.* Contact stiffness machines – Moscow: Mashinostroenie, 1971. – 264 P. 7. *Push V.Je.* Construction cutting machines – Moscow: Mashinostroenie, 1977. — 390 P. 8. *Strutinskij V.B., Perfilov I.V.* Equipment for high vibration machining micromachining with the formation of a special microprofile / Bulletin of National technical University "Kharkiv Polytechnic Institute".- Kharkov : NTU "KhPI", 2015. - No4. – pP. 23-27.

Поступила (received) 15.10.2015

Струтинський Василь Борисович – д.т.н., проф., заслужений діяч науки і техніки України, завідувач кафедри конструювання верстатів та машин Національний технічний університет України «КПІ», тел.: (044) 454-94-61, e-mail: kvm_mmi@mail.ru;

Strutynskiy Vasyly Borysovych – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, honored worker of science and engineering of Ukraine, head of design tools and machines, National Technical University of Ukraine «KPI», tel.: (044) 454-94-61, e-mail: kvm_mmi@mail.ru;

Юрчишин Оксана Ярославовна – к.т.н., доц. Національний технічний університет України «КПІ», тел.: (044) 454-94-61, e-mail: kvm_mmi@mail.ru;

Yurchyshyn Oksana Yaroslavovna – Candidate of Technical Sciences, Docent, National Technical University of Ukraine «KPI», tel.: (044) 454-94-61, e-mail: kvm_mmi@mail.ru;

Чуприна Володимир Михайлович – к.т.н., доц. Державний науково-випробувальний центр Збройних Сил України, м. Чернігів;

Chupryna Volodymyr Mykhailovych – Candidate of Technical Sciences, Docent, The Chernihiv State Research and Testing Center of the Armed Forces of Ukraine, Chernihiv.

УДК 621. УДК 621.9.06-9.11

О.О. БАРАНОВ, Г.И. КОСТЮК**ОСАЖДЕНИЕ КАЧЕСТВЕННОГО РАВНОТОЛЩИННОГО ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ПОКРЫТИЯ НА ТВЕРДОСПЛАВНЫЙ РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ ПРИ ОБРАБОТКЕ БОЛЬШИХ ПАРТИЙ**

Предложена схема технологического устройства для осаждения качественного равнотолщинного вакуумно-дугового покрытия на твердосплавный режущий инструмент при обработке больших партий на подложках диаметром до 400 мм. Управление потоками плазмы вакуумно-дугового источника осуществляется путем создания системы магнитных ловушек на пути распространения потока плазмы, а для ионной очистки и предварительного разогрева изделий используется магнетронный разряд. Управляющие магнитные поля создаются системой электромагнитов, размещенных под подложкой.

Ключевые слова: металорезальный верстат, пружна система, підсистема, жорсткість, тензор, просторова модель

Введение. Покрытия, осажденные на режущий инструмент из потоков плазмы вакуумно-дугового источника по методу конденсации с ионной бомбардировкой (КИБ), позволяют в 3–5 раз повысить стойкость инструмента, снизить силы резания и улучшить качество механической обработки за счет изменения характера износа [1]. При осаждении покрытия на большие партии инструмента актуальным становится вопрос равномерной обработки и формирования равнотолщинных покрытий на все инструменты партии, независимо от их положения относительно источника плазмы.

Анализ последних исследований и литературы. Как показали результаты [2], режущие инструменты достигают режима насыщения зависимости микротвердости от толщины покрытия, когда толщина покрытия достигает 5 мкм при давлении реактивного газа в камере в диапазоне $3 \cdot 10^{-2}$ – $3 \cdot 10^{-1}$ Па. Максимум прочностных характеристик покрытия также приходится на его толщину в пределах 5–10 мкм [3]. Ранее было показано [4], что зависимость толщины покрытия от плотности ионного тока вдоль поверхности подложки имеет нелинейный характер. Уменьшение плотности ионного тока от центра подложки к ее краю приводит к осаждению менее плотных покрытий, что соответствует характерным изменениям на диаграмме структурных зон. Исследование показало хорошую работоспособность покрытий с толщиной порядка 5 мкм, осажденных при плотности ионного тока не менее 30 А/м². Толщина покрытий из TiN главным образом зависит от расположения инструмента в вакуумной камере относительно вакуумно-дугового источника плазмы. На торцевой и боковой поверхности в зависимости от размера инструмента она может отличаться (это же относится и к задним, закрытым поверхностям). Толщина покрытия также зависит от разнотолщинности изделия и условий его крепления к оснастке, что определяет разную температуру нагрева в различных зонах. Таким образом, обеспечение одинаковой толщины покрытий, осажденных на режущие пластины, находящиеся на разном удалении от выхода плазмоведа, позволяет стабилизировать фазовый состав покрытий, а следовательно, избежать разброса стойкости инструмента. Для решения этой задачи необходимо обеспечить не

только равномерную обработку поверхности режущих пластин потоками ионов, но и провести тщательную ионную очистку и нагрев заготовок.

Целью данной работы является разработка технологического устройства, которое позволяет проводить комплексную плазменно-ионную обработку твердосплавного режущего инструмента для осаждения равнотолщинных покрытий с высокими эксплуатационными характеристиками.

Постановка проблемы. Наши исследования в представляемой работе направлены на применение ранее разработанного метода управления потоками ионов газа и металлов с помощью системы магнитных ловушек электронов плазмы [5] для обработки режущего инструмента ионным потоком с заданным распределением плотности вдоль поверхности подложки.

Материалы исследований. Схема технологической установки и оснастки для реализации технологического процесса осаждения качественных равнотолщинных вакуумно-дуговых покрытий на твердосплавный режущий инструмент представлена на рис. 1. Осаждение покрытия проводилось вакуумно-дуговым методом [6] на установке «Булат-6», схема расположения резцов в вакуумной камере соответствует описанию, приведенному в [7].

Плазменно-ионной обработке подвергались сменные многогранные пластины с отверстием и стружколомающими канавками на одной стороне, изготовленные из твердого сплава марки Т15К6 и предназначенные для токарных проходных резцов.

Использовались пластины трех видов:

- пятигранной формы PNMM-110416 с длиной режущей кромки $l = 11,5$ мм, толщиной $s = 4,76$ мм;
- квадратной формы SNMM-150416 с длиной режущей кромки $l = 15,875$ мм, толщиной $s = 4,76$ мм;
- шестигранной формы с углом 80° WNUM-080404 с длиной режущей кромки $l = 8,7$ мм, толщиной $s = 4,76$ мм.

Ионная очистка и нагрев заготовок проводились в среде магнетронного и дугового разряда. Магнетронный разряд используется для очистки и нагрева основной массы заготовок, а дуговой – для очистки и нагрева заготовок, которые расположены в центральной части подложки, в области слабого действия магнетронного разряда.

© О.О. Баранов, Г.И. Костюк, 2015

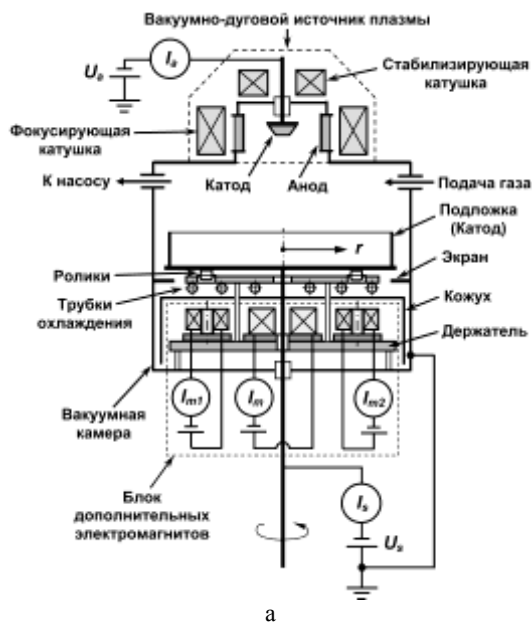


Рис. 1 – Установка для реализации технологического процесса осаждения качественных вакуумно-дуговых покрытий на твердосплавный режущий инструмент при обработке больших партий: а – схема; б – подложка с оснасткой для размещения режущих пластин

Для обработки в магнетронном разряде используется центральный электромагнит, а для обработки в дуговом – два боковых электромагнита (рис. 1), которые работают в режиме фокусировки плазмы в центр подложки в сочетании с вращением подложки. Затем следует осаждение тонкого покрытия Ti, после чего проводится напыление основного слоя TiN; на этом этапе боковые электромагниты работают в режиме расфокусировки плазменного потока, что в сочетании с вращением подложки должно обеспечить осаждение равномерного покрытия.

Был разработан процесс нанесения покрытия TiN на поверхность твердосплавных пластин для обеспечения равной толщины и стойкости пластин. Перед проведением техпроцесса с использованием управляющих магнитных полей были согласованы направления магнитных полей дополнительных электромагнитов с направлением магнитных полей стабилизирующей и фокусирующей катушек (магнитное поле источника). Токи электромагнита, когда созданное им поле направлено согласно с магнитным полем

источника, обозначены в символе « \uparrow ». Токи, создающие противоположно направленное магнитное поле, обозначены символом « \downarrow ». Ток дуги I_a при отключенных дополнительных электромагнитах должен быть равен 110 А, чтобы при включении магнитного блока произошло его уменьшение до 100 А, что соответствует техпроцессу.

Осаждение вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN на поверхности твердосплавных пластин согласно техпроцессу с использованием управляющих магнитных полей осуществлялось на таких режимах:

- 1) ионная очистка в магнетронном разряде: давление газа $P = 1$ Па, напряжение на подложке $U_s = 1200$ В, ток электромагнита $I_m = 1$ А, время обработки $t = 5$ минут;
- 2) нагрев заготовок в магнетронном разряде: давление газа $P = 1$ Па, ток на подложку $I_s = 12$ А, ток центрального электромагнита $I_m = 2,2$ А, время обработки $t = 4$ минуты;
- 3) ионная очистка в дуговом разряде ионами Ti: давление $P = 6,65 \cdot 10^{-3}$ Па, напряжение на подложке $U_s = 1000$ В, ток дуги $I_a = 100$ А, ток стабилизирующей катушки $I_f = 1,6$ А, ток фокусирующей катушки $I_g = 0,6$ А, время обработки $t = 1$ минута;
- 4) нанесение покрытия Ti: давление $P = 6,65 \cdot 10^{-3}$ Па, напряжение на подложке $U_s = 230$ В, ток дуги $I_a = 100$ А, ток стабилизирующей катушки $I_f = 1,6$ А, ток фокусирующей катушки $I_g = 0,6$ А;

схема включения боковых электромагнитов такая:

$I_{m1} = 2 \text{ A} \downarrow$ и $I_{m2} = 0 \text{ A}$ – 54 секунды, затем переключение на режим;

$I_{m1} = 2 \text{ A} \downarrow$ и $I_{m2} = 2 \text{ A} \uparrow$ – 54 секунды, затем переключение на режим;

$I_{m1} = 2 \text{ A} \downarrow$ и $I_{m2} = 4 \text{ A} \uparrow$ – 54 секунды, затем переключение на режим;

$I_{m1} = 0 \text{ A}$ и $I_{m2} = 4 \text{ A} \uparrow$ – 18 секунд, конец цикла, время обработки $t = 3$ минуты (1 цикл);

5) нанесение покрытия TiN: давление $P = 0,05$ Па, напряжение на подложке $U_s = 230$ В, ток дуги $I_a = 100$ А, ток стабилизирующей катушки $I_f = 1,6$ А, ток фокусирующей катушки $I_g = 1,6$ А;

схема включения боковых электромагнитов такая:

$I_{m1} = 2 \text{ A} \downarrow$ и $I_{m2} = 0 \text{ A}$ – 1 минуты, затем переключение на режим;

$I_{m1} = 2 \text{ A} \downarrow$ и $I_{m2} = 2 \text{ A} \uparrow$ – 1 минуты, затем переключение на режим;

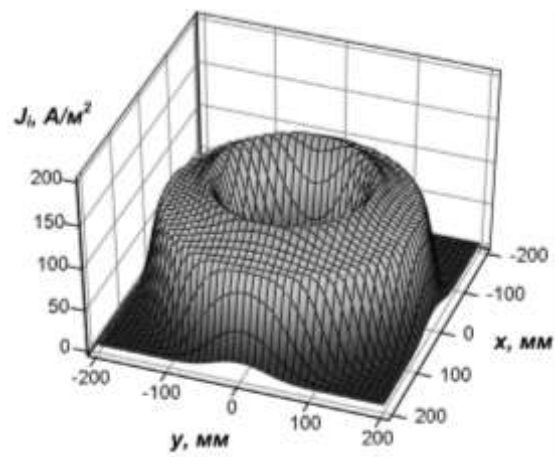
$I_{m1} = 2 \text{ A} \downarrow$ и $I_{m2} = 4 \text{ A} \uparrow$ – 1 минуты, затем переключение на режим;

$I_{m1} = 0 \text{ A}$ и $I_{m2} = 4 \text{ A} \uparrow$ – 20 секунд, затем переключение на начало цикла, пока количество циклов не достигнет 12;

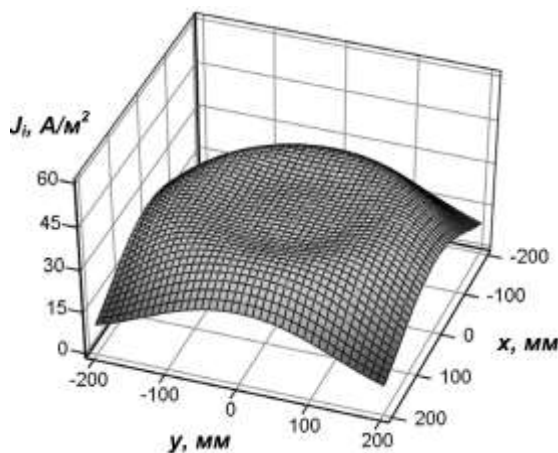
время обработки $t = 40$ минут (12 циклов), используемый газ – азот N_2 .

Результирующие распределения плотности ионного тока представлены на рис. 2, а – при обработке ионами газа в среде магнетронного разряда на этапе ионной очистки и нагрева, и на рис. 2, б – при обработке

в среде вакуумно-дугового разряда на этапе осаждения покрытия



а



б

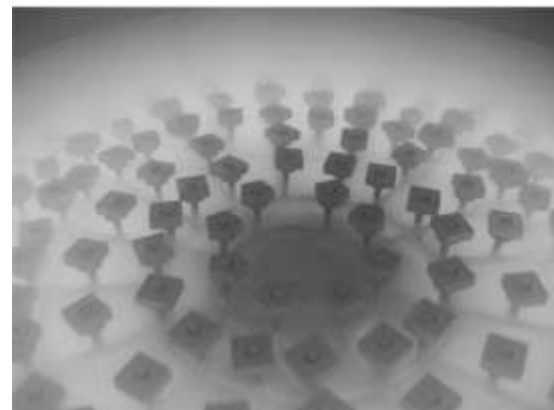
Рис. 2 – Распределение плотности ионного тока при обработке твердосплавного режущего инструмента на этапах: а – очистки и нагрева в магнетронном разряде; б – осаждения вакуумно-дугового покрытия

Фотографии процесса обработки представлены на рис. 3, а – при обработке среде магнетронного разряда на этапе ионной очистки и нагрева, и на рис. 3, б – при обработке плазмой вакуумно-дугового разряда на этапе осаждения покрытия.

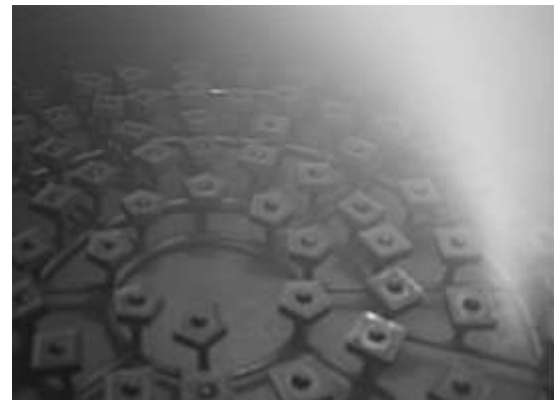
Результаты исследований. После осаждения покрытия пластины были исследованы в целях определения распределения толщины покрытия в зависимости от места, которое пластина занимала на подложке при осаждении, для чего были сделаны микрошлифы. Фотография микрошлифа представлена на рис. 4, а; распределение толщины покрытия вдоль радиуса подложки – на рис. 4, б.

Измерения показали, что покрытия на режущих пластинах имеют толщину в пределах 4,2 мкм с коэффициентом неравномерности порядка 4 % при радиусе подложки до 150 мм, после чего толщина покрытия уменьшается до 3,72 мкм при радиусе 160 мм. Таким образом, при диаметре подложки 300 мм предложенный метод позволяет осаждавать равнотолщин-

ные покрытия, удовлетворяющие требованиям электронной промышленности (< 5 %, [85]).



а



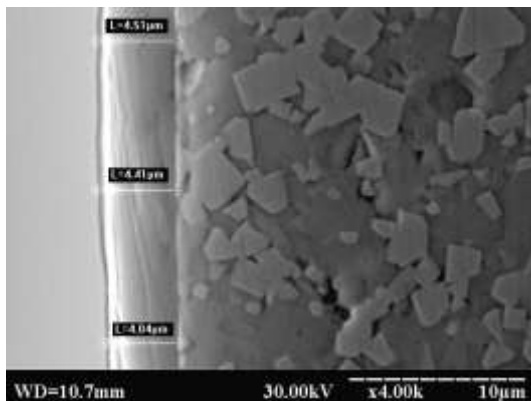
б

Рис. 3 – Процесс ионной обработки для осаждения равнотолщинного вакуумно-дугового покрытия: а – очистка и нагрев в магнетронном разряде; б – осаждение покрытия

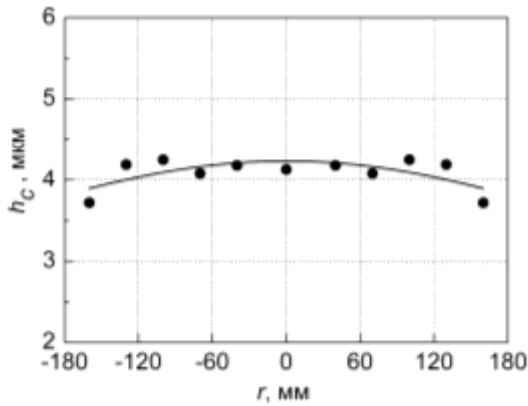
При обработке подложек диаметром 320 мм средняя толщина покрытия снижается до 4,1 мкм, а неравномерность увеличивается до 13 % за счет уменьшения толщины покрытия на краях подложки вследствие уменьшения плотности ионного тока. Однако подобная неравномерность может быть некритичной для менее требовательных технологий (осаждение декоративных или защитных покрытий), что позволяет обрабатывать подложки диаметром до 400 мм. Для определения размеров подложки, которая позволяет осаждавать покрытия, одинаковые с точки зрения износостойкости инструмента, были проведены исследования пластин с покрытием на износ.

Стойкость режущего инструмента на износ исследовалась при токарной обработке коррозионно-стойкой, жаропрочной стали мартенситно-ферритного класса 14X17H2 (ЭИ268) [8]. Для механической обработки были выбраны такие режимы точения продольной подачей [9]:

- получистовая обработка: скорость резания $V_p = 230$ м/мин, глубина резания $t_p = 1,0$ мм при подаче $s = 0,21$ мм/об;
- чистовая обработка: скорость резания $V_p = 280$ м/мин, глубина резания $t_p = 0,5$ мм при подаче $s = 0,11$ мм/об.



а



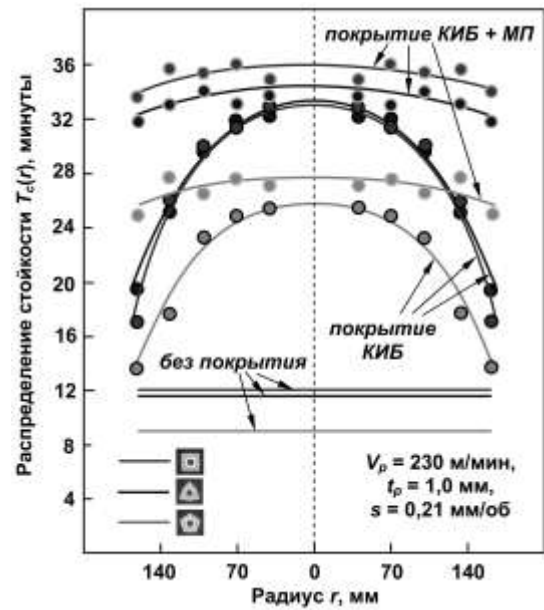
б

Рис. 4 – Результаты измерений распределения толщины покрытия вдоль поверхности подложки для процесса с управляющими магнитными полями: а – фотография микрошлифа; б – распределение толщины покрытия

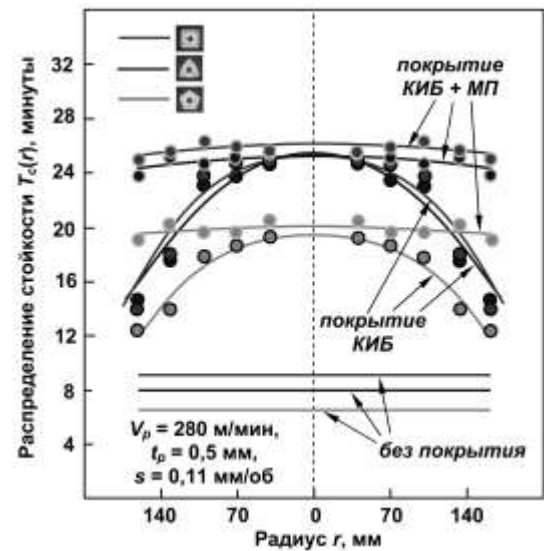
При определении износа использовался инструментальный микроскоп БМИ-1Ц с ценой деления 5 мкм. В качестве критериев износа режущих пластин для операций получистовой и чистовой обработки были выбраны износ по задней поверхности резца 0,4 и 0,3 мм, соответственно [9]. Зависимости h_z износа главной задней поверхности твердосплавных режущих пластин с покрытием, осажденным согласно технологическому процессу с использованием управляющих магнитных полей, показали существенные отличия по сравнению с базовой технологией в характере распределения стойкости режущих пластин с покрытием, осажденным на образцы в различных зонах осаждения, на различных удалениях от центра подложки [7]. По результатам измерений отмечен некоторый рост стойкости примерно на 7 %, который предположительно объясняется воздействием ионов повышенной энергии (потенциал смещения 230 В вместо 200 В для базового варианта) [10].

Распределение стойкости пластин с покрытием, полученным согласно различным техпроцессам, вдоль радиуса подложки представлены на рис. 5, а – для получистовой и на рис. 5, б – для чистовой обработки.

Полученные результаты можно объяснить таким образом. Стойкость инструмента с покрытием зависит от толщины покрытия [11], а также плотности ионного тока.



а



б

Рис. 3 – Распределение стойкости твердосплавных режущих пластин вдоль радиуса подложки: а – $V_p = 230$ м/мин, $t_p = 1,0$ мм, $s = 0,21$ мм/об; б – $V_p = 280$ м/мин, $t_p = 0,5$ мм, $s = 0,11$ мм/об

Получение стехиометрического или близкого к нему состава и формирование нитрида титана происходят при достижении толщины покрытия порядка 4–5 мкм [2], что объясняет влияние толщины покрытия на микротвердость [2] и стойкость инструмента. Зависимость микротвердости от толщины имеет нелинейный характер, причем при толщине покрытия менее 4 мкм происходит увеличение стойкости при увеличении толщины, затем стойкость практически не изменяется при толщине покрытия 4–5 мкм. При этом для всех участков подложки возможно формирование покрытия оптимального фазового состава и получение одинаково высоких значений стойкости инструмента.

Выводы.

По сравнению с базовым техпроцессом КИБ [7] общее время обработки потоками плазмы твердосплавных режущих пластин в вакуумной камере при реализации предлагаемого техпроцесса увеличивается до 53 минут, причем 43 минуты из них составляет время осаждения тонкого покрытия Ti и основного покрытия TiN. Аналогичное время для базового техпроцесса КИБ составляет 54,5 и 28,5 минут. Таким образом, общее время обработки для обоих техпроцессов практически одинаково, хотя время осаждения покрытия для техпроцесса КИБ с использованием дополнительных магнитных полей увеличивается в 1,5 раза. При необходимости осаждают покрытия с обеспечением одинаковой стойкости режущих пластин базовый техпроцесс позволяет обработать площадь порядка $3,14 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$ (круг диаметром до 20 см с центром в центре подложки). Техпроцесс с использованием дополнительных магнитных полей позволяет обрабатывать площадь порядка $8 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$ (диаметр до 32 см), что сопровождается увеличением в 2,6 раза количества одновременно обрабатываемых режущих пластин. В результате этого предлагаемый техпроцесс позволяет повысить производительность всего процесса плазменно-ионной обработки в 2,6 раза. На основании чего можно сделать вывод о его экономической эффективности и целесообразности внедрения на предприятиях.

Список литературы: 1. Костюк Г. И. Физико-технические основы напыления покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий. Справочник для расчета основных физических и технологических параметров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования: моногр. [Текст] / Г. И. Костюк. – К. : Изд-во АИНУ, 2002. – Кн. 2. – 441 с. 2. Мацевитый, В. М. Покрытия для режущих инструментов [Текст] / В. М. Мацевитый. – Х. : Вища шк. Изд-во Харьк. ун-та, 1987. – 128 с. 3. Андреев, А. А. Влияние давления азота при осаждении сверхтвердых TiN покрытий на их свойства [Текст] / А. А. Андреев, В. М. Шулаев, В. Ф. Горбань, В. А. Столбовой // Физическая инженерия поверхности. – 2007. – Т. 5, № 3-4. – С. 203-206. 4. Baranov, O. Effect of ion current density on the properties of vacuum arc-deposited TiN coatings [Text] / O. Baranov, J. Fang, A. Rider, P. Kumar, K. Ostrikov // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2013. – V. 41, № 12. – P. 3640–3644. 5. Baranov, O. Effective control of ion fluxes over large areas by magnetic fields: from narrow beams to highly uniform fluxes [Text] / O. Baranov, M. Romanov, K. Ostrikov // Physics of plasma P. – 2009. – № 16. – P. 053505-1-053505-5. 6. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия [Текст] / А. А. Андреев, Л. П. Саблев, В. М. Шулаев,

С. Н. Григорьев. – Х. : ННЦ ХФТИ, 2005. – 236 с. 7. Эффективность вакуумно-плазменного покрытия TiN на твердосплавном режущем инструменте при токарной обработке стали 14X17H2 [Текст] / О. О. Баранов, М. С. Романов, А. А. Бреус, Р. В. Воропай // Вестник Нац. техн. ун-та «Харьковский политехнический институт»: сб. науч. тр. Нац. техн. ун-та «ХПИ». – Вып. 40. – Х., 2011. – С. 164–169. 8. Стали и сплавы. Марочник: справ. / В. Г. Сорокин, М. А. Гервасьев, В. С. Палеев и др. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 608 с. 9. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: справ. / Я. Л. Гуревич, М. В. Горохов, В. И. Захаров и др. – М.: Машиностроение, 1986. – 240 с. 10. Андреев, А. А. Вакуумно-дуговое модифицирование поверхности стальных изделий [Текст] / А. А. Андреев // Физическая инженерия поверхности. – 2007. – Т. 5, № 3-4. – С. 140-148. 11. Верещака, А. С. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями [Текст] / А. С. Верещака, И. П. Третьяков. – М.: Машиностроение, 1986. – 192 с.

Bibliography (transliterated): 1. Kostjuk G. I. Fiziko-tehnicheskie osnovy napylenija pokrytij, ionnoj implantacii i ionnogo legirovanija, lazernoj obrabotki i uprochnenija, kombinirovannyh tehnologij. Spravochnik dlja rascheta osnovnyh fizicheskij i tehnologicheskij parametrov, ocenki vozmozhnostej, vybora tipa tehnologij i oborudovanija: monogr. [Текст] / G. I. Kostjuk. – Kiev : Izd-vo AINU, 2002. – Book 2. – 441 P. 2. Macevityj, V. M. Pokrytija dlja rezhushchih instrumentov [Текст] / V. M. Macevityj. – Kharkov : Vishha shkola. Izd-vo Har'kovskogo un-ta, 1987. – 128 P. 3. Andreev, A. A. Vlijanie davlenija azota pri osazhdenii sverhtverdyh TiN pokrytij na ih svojstva [Текст] / A. A. Andreev, V. M. Shulaev, V. F. Gorban', V. A. Stolbovoj // Fizicheskaja inzhenerija poverhnosti. – 2007. Vol. 5, No 3-4. P. 203–206. 4. Baranov, O. Effect of ion current density on the properties of vacuum arc-deposited TiN coatings [Text] / O. Baranov, J. Fang, A. Rider, P. Kumar, K. Ostrikov // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2013. – Vol. 41, No 12. – P. 3640–3644. 5. Baranov, O. Effective control of ion fluxes over large areas by magnetic fields: from narrow beams to highly uniform fluxes [Text] / O. Baranov, M. Romanov, K. Ostrikov // Physics of plasma P. – 2009. – No 16. – P. 053505-1-053505-5. 6. Vakuumno-dugovye ustrojstva i pokrytija [Текст] / А. А. Андреев, Л. П. Саблев, В. М. Шулаев, П. Н. Григор'ев. – Kharkov : NNC HFTI, 2005. – 236 P. 7. Jeffektivnost' vakuumno-plazmennogo pokrytija TiN na tverdosplavnom rezhushhem instrumente pri tokarnoj obrabotke stali 14H17N2 [Текст] / О. О. Баранов, М. С. Романов, А. А. Бреус, Р. В. Воропай // Vestnik Nacional'nogo tehniceskogo universiteta «Har'kovskij politehnicheskij institut»: sb. nauch. tr. Nac. tehn. un-ta «KhPI». – VyP. 40. – H., 2011. – С. 164–169. 8. Stali i splavy. Marochnik: sprav. / V.G. Sorokin, M.A. Gervas'ev, V.P. Paleev i dr. – Moscow: Intermet Inzhiniring, 2001. – 608 P. 9. Rezhimy rezanija trudnoobrabatyvaemyh materialov: sprav. / Ja.L. Gurevich, M.V. Gorohov, V.I. Zaharov i dr. – Moscow: Mashinostroenie, 1986. – 240 P. 10. Andreev, A. A. Vakuumno-dugovoe modifizirovanie poverhnosti stal'nyh izdelij [Текст] / А. А. Андреев // Fizicheskaja inzhenerija poverhnosti. – 2007. Vol. 5, No 3-4 – P. 140–148. 11. Vereshhaka, A. P. Rezhushhie instrumenty s iznosostojkimi pokry-tijami [Текст] / А. П. Vereshhaka, I. P. Tret'jakov. – Moscow: Mashino-stroenie, 1986. – 192 P.

Поступила (received) 20.06.2015

Баранов Олег Олегович – канд. техн. наук, доц. НАУ «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: olbaranov@yahoo.com;

Baranov Oleh Olehovych – Candidate of Technical Sciences, Docent, National Aerospace University «KhAI», tel.: (057)-788-42-06; e-mail: olbaranov@yahoo.com;

Костюк Геннадий Игоревич – док. техн. наук, проф. НАУ «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Kostyuk Gennadiy Igorevich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Aerospace University «KhAI», tel.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

УДК 519.2

А.В. ФЕСЕНКО, В.Д. ХИЦАН, Н.П. СКИДАН

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОТОЧНЫХ КАВИТАЦИОННЫХ АКТИВАТОРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЖ

В статье предложен способ активации СОЖ в проточных гидродинамических устройствах, позволяющий выполнять интенсивное перемешивание и кavitационную обработку эмульсий, как на стадии ее приготовления, так и при восстановлении. Дан анализ процесса, происходящим при прохождении потока через щелевые смесители и кavitационные насадки. Разработан стенд для экспериментального исследования параметров потока при постоянной энергии на входе. Проведено экспериментальное исследование проточных смесителей и кavitационных насадок, на основании которого разработана установка для круглошлифовального станка, обеспечивающая получение гомогенной и мелкодисперсной СОЖ.

Ключевые слова: шлифовальный станок, смесители, активация, давление, расход жидкости, кавитация, гидродинамическое воздействие, СОЖ.

Введение. Одним из важнейших факторов, обеспечивающих получение заданного качества шлифованных деталей и повышение производительности обработки, является рациональное применение смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ). К настоящему времени разработаны научные методики и предлагается ряд подходов к описанию процессов, происходящих в зоне резания при различных способах подготовки и подачи СОЖ в зону шлифования [1,2]. Проработан ряд аспектов научных основ применения СОЖ с введением дополнительной энергии [3]. В то же время мало внимания уделяется активации СОЖ при эксплуатации на шлифовальных станках на этапах подготовки и восстановления её основных функциональных свойств.

Анализ основных достижений и литературы. В последнее время все большее применение находят различные виды активации СОЖ, направленные на повышение ее эффективности при шлифовании. Считается, что при механической активации подвод энергии извне к технологической среде способствует преодолению атомами и молекулами потенциального барьера, препятствующего их взаимодействию с поверхностью металла в контактной зоне при резании. Кинетическая и потенциальная энергия частиц среды в процессе активации может достигать таких величин, при которых ослабляются или разрываются внутримолекулярные связи в молекуле вещества [4].

Актуальными становятся вопросы комплексной активации, т.е. создания таких систем охлаждения и смазки, которые включали бы какой-либо из методов физической активации, воздействующей на среду с составом, разработанным в соответствии с требованиями данного вида обработки. Естественно, такой комплексный подход к применению СОЖ должен завершаться рациональной системой подвода среды к зоне резания, объединяя в едином научно-техническом решении физико-химические и технические вопросы применения СОЖ [3].

Комплексный подход к использованию СОЖ при шлифовании включает в себя подготовку ее перед подачей в зону обработки. При этом кроме обычных систем очистки и охлаждения применяются устройства для интенсивного гидродинамического воздействия с возникновением эффекта кавитации [2, 3, 4].

Для этой цели могут использоваться как активные, так и пассивные устройства. Активные устройства [5] представляют собой гидродинамические установки, где энергия потоку сообщается во вращающемся роторе. Такие установки выполняют функции и насоса, и кавитатора одновременно. Пассивные активаторы при воздействии на жидкую среду используют энергию, получаемую потоком от насоса.

Помимо влияния на основные функциональные свойства среды, некоторые методы активации проявляют также бактерицидный, гомогенизирующий и другие дополнительные эффекты, повышающие экономичность применения технологических сред и улучшающие условия их эксплуатации [2].

Постановка задачи. При всем многообразии существующих способов механической активации, на наш взгляд, недостаточно внимания уделяется относительно простым и эффективным способам активации СОЖ в потоке с помощью проточных смесителей и кavitационных насадок. Необходимо выполнить анализ основных закономерностей потока СОЖ в проточных системах активизации, на основании которых разработать индивидуальную систему смешения и кavitационной обработки СОЖ для круглошлифовального станка.

Материалы исследований. Для исследований выбраны насадки, представляющие собой местное сужение в конфузоре, цилиндрический участок и плавное расширение в диффузоре. Рассмотрим явления кавитации при прохождении жидкости через такую насадку, (рис 1).

Для оценки кавитационных свойств насадки, можно воспользоваться числом кавитации [7].

$$\chi = \frac{P_1^* - P_{КАВ}}{\rho \cdot V_{ПР}^2 / 2}$$

Используются следующие параметры потока: давление перед конфузуром P_1 , скорость в проходном (узком) сечении $V_{ПР}$, давление кавитации $P_{КАВ}$, которое можно заменить на давление насыщенных паров текучей жидкости P_H [7].

Рассмотрим движение жидкости через квитирующее устройство.

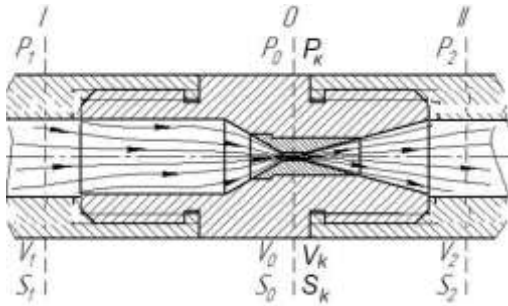


Рис. 1 - Схема течения жидкости в насадке

Для этого воспользуемся уравнением Бернулли для реальной жидкости с учетом потерь давления только на преодоление местного сопротивления:

$$P_1 + \frac{\rho \cdot V_1^2}{2} = P_0 + \frac{\rho \cdot V_0^2}{2} + \Delta P_{MC}$$

где: ΔP_{MC} – потери давления на преодоление местного сопротивления.

Известно [6], что ΔP_{MC} пропорционально скоростному напору, тогда

$$\Delta P_{MC} = \xi_1 \cdot \frac{\rho \cdot V_1^2}{2}$$

где: ξ_1 – коэффициент местного сопротивления от сечения на входе S_1 до сечения сжатой струи S_0 .

Преобразования, выполненные с учетом сечений на входе S_1 в насадку и проходного сечения S_{np} , с учетом коэффициента сжатия струи ε позволяют получить формулу для критического числа кавитации в виде

$$\chi_{кр} = \left(\frac{S_1^2}{S_{np}^2 \cdot \varepsilon^2} - 1 \right) + \xi_1$$

Из формулы видно, что, чем больше будет сжатие струи ε и меньше гидравлическое сопротивление ξ_1 , тем меньше будет критическое число кавитации $\chi_{кр}$.

При исследованиях [7] используются разные подходы к определению уровня кавитации. На практике данные из литературных источников бывают противоречивы, что не позволяет воспользоваться существующей информацией для проектирования кавитационных устройств. Поэтому, для каждой разрабатываемой системы проточных кавитаторов и для определенной эмульсии необходимо проводить экспериментальное исследование.

Обычно для таких исследований используется стенд, включающий в себя насос, краны регулировки потока и измерительную аппаратуру (манометры и расходомеры).

При такой схеме полная энергия потока E_0 будет зависеть от характеристики насоса. При закрытии магистрали, когда в ней нет движения жидкости, создается определенное давление. При этом потребляемая насосом энергия (расходуется) преобразуется в потенциальную энергию давления E_{II} и энергию, за-

трачиваемую на перемешивание и нагрев рабочей среды в насосе E_{S1} .

$$E_n = E_n + E_{S1} = \frac{P_n \cdot m}{\rho} + E_{S1}$$

где: P_n – создаваемое насосом давление, m – масса элемента жидкости, ρ – плотность данной жидкости.

При открытии крана в магистрали начинается движение жидкости. При этом характеристика насоса определяется взаимосвязью давления P и расхода Q .

В конечном итоге при движении жидкости вся энергия, создаваемая насосом, расходуется на создание потока, преодоление внешней нагрузки и гидравлических сопротивлений в трубопроводах и устройствах. При этом полная энергия потока будет включать в себя энергию давления E_n , энергию движения E_k , потери энергии в сопротивлениях (трубопроводах и других устройствах) E_c и энергию E_{S2} , затрачиваемую на перемешивание, возвратные потоки и возможную кавитацию в насосе, внешним проявлением которых будет нагрев рабочей среды.

Суммарная энергия потока будет:

$$E_n = E_n + E_k + E_c + E_{S2}$$

Для проведения испытаний насадок можно использовать стенд (Рис.2). Здесь источником энергии потока жидкости является насос. Тогда, исходя из посылок о сохранении энергии в потоке, можно записать:

$$\frac{P_n \cdot m}{\rho} + E_{S1} = \frac{P \cdot m}{\rho} + \frac{V^2 \cdot m}{\rho} + E_c + E_s$$

где: P – давление в модуле, V – скорость движения в модуле, E_{S2} – потери энергии при новых условиях работы насоса.

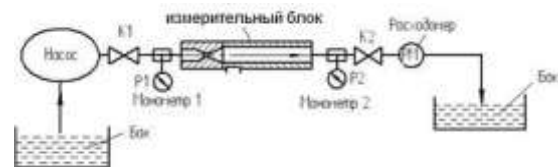


Рис. 2– Испытательный стенд с насосом

На таком стенде предусмотрена регулировка потока с помощью кранов перед (K_1) и после (K_2) насадки. Во время испытаний выполняется замеры давления (P_1 и P_2) и расхода (PM).

Для того чтобы исключить влияние характеристики насоса на энергетику потока надо обеспечить постоянную величину энергии на входе E_0 , как при отсутствии движения жидкости, так и в потоке.

Для этого был разработан стенд, в котором поддержание постоянной энергии потока на входе ($E_0 = \text{const}$) обеспечивается за счет постоянного усилия на штоке рабочего цилиндра, подающего СОЖ на испытываемое устройство (Рис.3).

Стенд (см. рис.3) имеет гидроцилиндр, давление на штоке которого поддерживается с помощью редукционных клапанов. Гидроцилиндр через муфту связан с рабочим цилиндром подачи СОЖ, из которого рабочая среда передается на измерительный блок. После опустошения рабочей полости рабочего цилиндра

дра происходит перезарядка (во время обратного хода).

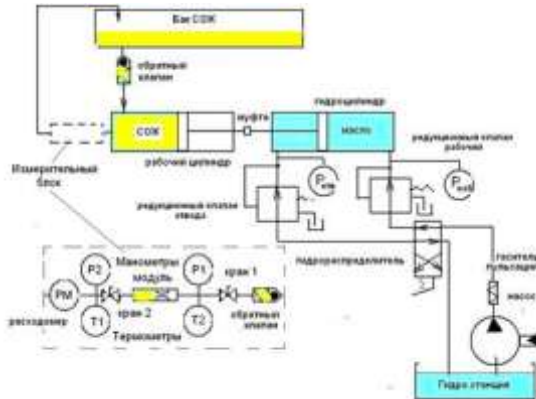


Рис. 3 – Стенд для испытания проточных активаторов

Поскольку высота уровня жидкости в баке относительно измерительного блока обычно не превышает $H = 0.5$ м, то энергией положения можно пренебречь. В этом случае уравнение сохранения энергии в потоке принимает вид:

$$\frac{P_0 \cdot m}{\rho} = \frac{P \cdot m}{\rho} + \frac{V^2 \cdot m}{2} + E_c$$

тогда уравнение баланса удельной энергии для потока с учетом потерь будет:

$$\frac{P_0}{\rho \cdot g} = \frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{V_1^2}{2g} + \Delta h$$

Было проведено исследование зависимости параметров потока от конструктивных элементов кавитаторов. При проведении исследований изменялись следующие параметры: диаметры отверстия $dk = 1, 2, 3$ мм; длина цилиндрической части $L = 0, 3, 9$ мм; угол конуса на выходе $\alpha = 15^\circ, 30^\circ, 60^\circ$.

Выполнялся замер давления на входе P_1 и выходе P_2 , температура жидкости в этих точках T_1 и T_2 и расход жидкости через измерительный блок Q .

Для определения параметров потока при обработке экспериментальных данных использовались расчетные формулы:

$$\text{Скорость в насадке- } V_k = 278 \frac{Q}{S_k}$$

$$\text{Потери мощности - } N = 27.25 \cdot Q \cdot \Delta P$$

Коэффициент сопротивления-

где Q (м³/час), V_k (м/сек), ΔP (кГ/см²), S_k (мм²), для воды $\rho = 100$ (кГ·сек²/м⁴),

Для определения давления в узкой части насадки использовался принцип, заложенным в основу расходомера Вентури. После преобразований расчетных зависимостей была получена формула для определения давления в кавитаторе P_n . Для расчетов использовались данные полученные при эксперименте: давление на входе P_1 , скорости потока в центральной части насадки V_k и в трубе V_{mp}

$$P_k = P_1 - \frac{(V_k^2 - V_{mp}^2) \cdot \rho}{2}$$

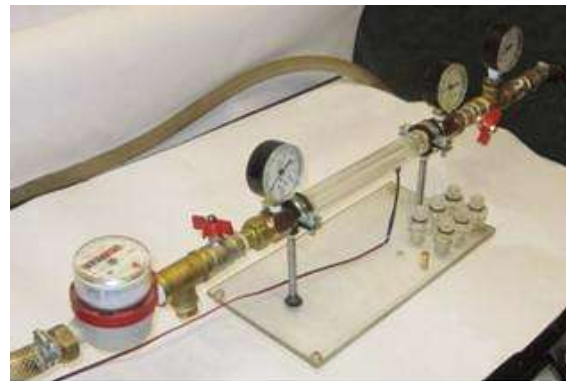


Рис. 4 – Стенд для испытаний кavitационных насадок

На рисунке 4 показана установка, на которой проводились испытания насадок. Кроме замеров и расчетов перечисленных выше параметров в измерительном блоке через прозрачную трубу выполнялось визуальное наблюдение за состоянием потока.

Ниже приведен пример обработки экспериментальных данных для кавитатора со следующими параметрами $D_{ax} = 10$ мм, $D_{вых} = 10$ мм, $d_k = 2$ мм, $\alpha_{ax} = 60^\circ$, $\alpha_{вых} = 30^\circ, L = 3$ мм.

Результаты опытов и вычислений приведены на графиках (рис.5)

По результатам проведенных исследований могут быть выбраны параметры кавитаторов, которые использовались при создании проточных активирующих систем.

На втором этапе выполнено исследование специального смесителя. В данной конструкции используются элементы, в которых происходит изменение направления движения жидкости. Это приводит к возникновению турбулентных течений и взаимопроникновения отдельных составляющих эмульсии. Такой прием позволяет сделать СОЖ гомогенной и уменьшить её дисперсность.

На рисунке 6 показана вставка в трубу. Конструкция вставки представляет собой сборный узел, в котором расположены блоки с наклонными пазами (Рис.7). Направление канавок парного блока изменяется под углом 90° .

Рассмотрим особенности потока в смесителе данной конструкции. Площадь сечения наклонного канала $S_f = 1 \text{ мм}^2$, всего 32 канала, тогда общая площадь сечения составит $S_k = 32 \text{ мм}^2$. В промежутке между секциями общая площадь сечения $S_n = 117 \text{ мм}^2$.

Скорости на отдельных участках вставки можно рассчитать по формулам: $V_k = Q/S_k = 278Q/32$ и $V_n = Q/S_n = 278Q/117$. Следует также учитывать, что направление потока изменялось под углом 90° , что создавало интенсивное перемешивание, а следовательно и потери энергии пропорционально величине скорости.

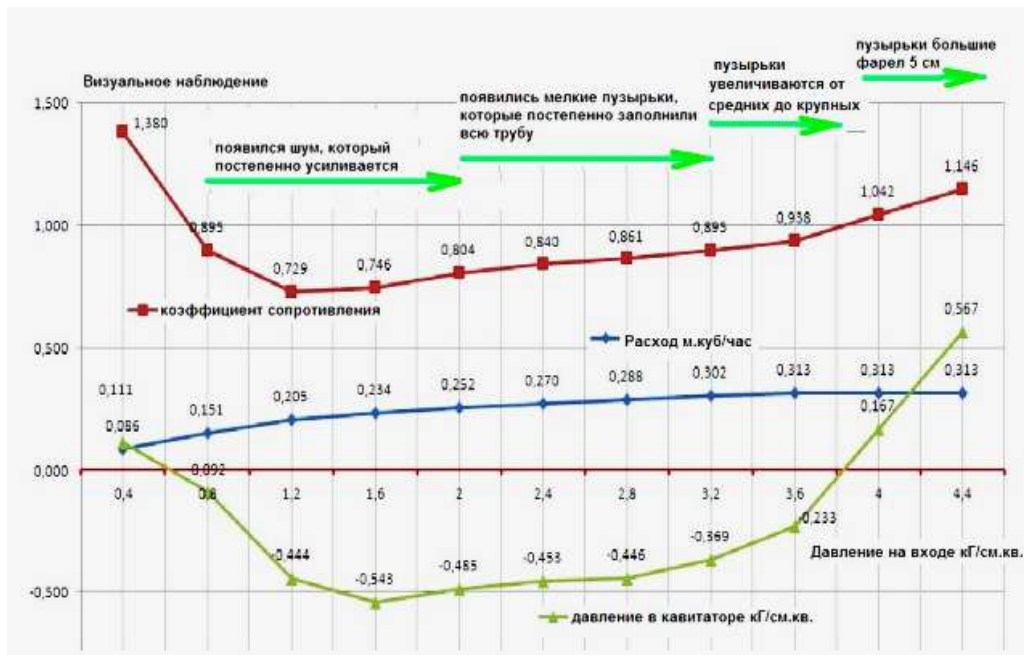


Рис. 5 - Данные по испытаниям кавитатора

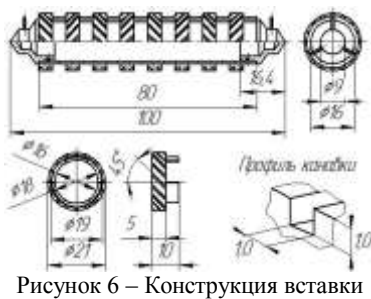


Рисунок 6 – Конструкция вставки



Рис. 7 –Вставка в смеситель

При испытаниях смесителя изменяли давление на входе P_1 и количество блоков n . Измерительный блок был аналогичен, показанному на рисунке 3.

В результате проведенных испытаний были установлены закономерности изменения расхода, а следовательно, и скоростей потока и сопротивления в зависимости от давления на входе и количества секций в смесителе (рис. 8).

Проведенные исследования смесителей позволили определить влияние их конструктивных параметров (в частности, количество секций) на гидродинамические показатели потока, что в дальнейшем легло в основу расчетов при конструировании блока смешения для станка.

Для приготовления и восстановления эмульсий при индивидуальной системе использования СОЖ нами разработан узел смешения с проточными эле-

ментами (рис. 9). Данная конструкция позволяет выполнять интенсивное перемешивание эмульсии и вводить необходимые добавки.

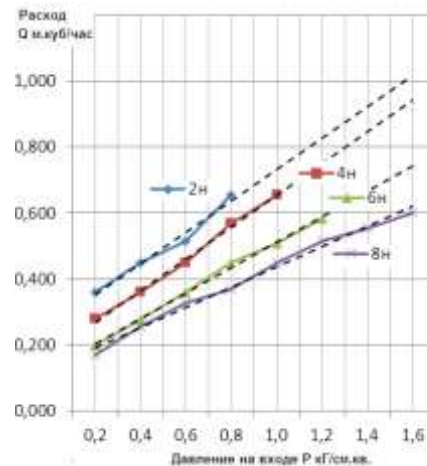


Рис. 8 - Изменение расхода при изменении давления на входе

В корпусе 1 канал входа выполнен в виде конфузора 2 и диффузора 3. На переходном участке расположены каналы для подвода дополнительных компонентов 4. Со стороны диффузора вводится игла 5, с помощью которой регулируется площадь проходного сечения. В цилиндрическом канале установлен смеситель, состоящий из набора колец 6 с проходными каналами, расположенными под углом 45° . Смеситель установлен на цилиндрическом участке иглы, которая соединена с регулируемой втулкой 7. Втулка имеет ряд отверстий для прохождения рабочей среды. Регулировка выполняется при повороте втулки на резьбе корпуса. Изоляция выполняется с помощью резиновых колец 8.

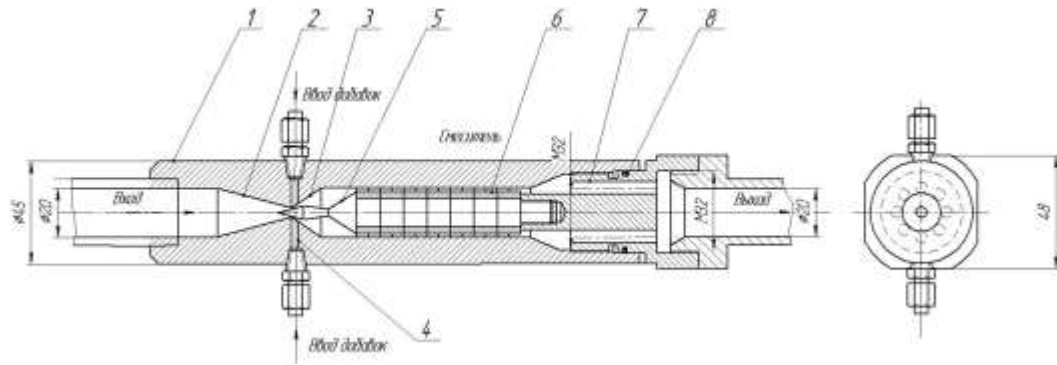


Рис. 9 – Узел смешения СОЖ

При анализе параметров потока на входе в смесителе без иглы (рис.10) потери на конфузоре можно рассчитать по формуле

$$\Delta P_K = \xi_K \cdot \frac{\rho \cdot V_1^2}{2}$$

$$\xi_K = k_2 \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2$$

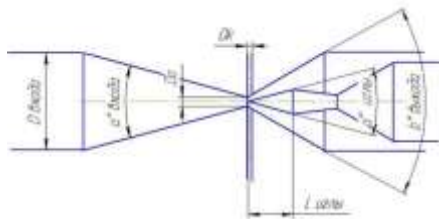


Рис. 10 – Фрагмент входа смесителя

На диффузоре потери рассчитываются как

$$\Delta P_D = \xi_D \cdot \frac{\rho \cdot V_2^2}{2}$$

$$\xi_D = \xi_{TP} + \xi_{раси}$$

$$\xi_{раси} = 3,2 \cdot (\operatorname{tg} 15^\circ)^{1,25} \left(1 - \frac{1}{n_1} \right)^2$$

$$\xi_{TP} = \frac{\lambda}{8} \cdot \sin 15^\circ \left(1 - \frac{1}{n_1} \right)^2$$

При использовании подвижной иглы характер движения жидкости изменяется. В общем случае данное устройство можно отнести к дросселям инерционного сопротивления, потеря напора в которых определяется в основном деформацией потока и вихреобразованием.

Сопротивление на входе в конфузоре-диффузоре меняется при перемещении иглы, с помощью которой изменяется проходное сечение.

Проходное сечение рассчитываем по формуле

$$Snp = S_o - S_i = 0,785 \cdot [D_o^2 - (2 \cdot L_i \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta_{усл}}{2})^2]$$

Максимальное перемещение иглы определяется как

$$L_{max} = \frac{D_o}{\sqrt{(2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta_{усл}}{2})^2}} = \frac{D_o}{2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta_{усл}}{2}}$$

При $D_o=4$ мм и $\beta=30^\circ$ $L_{max}=7,46$ мм. Вся длина иглы составляет $L_{игл}=25$ мм.

Наличие иглы изменяет характер потока, поэтому для получения необходимых данных было проведено экспериментальное исследование по определению дополнительного сопротивления при обтекании иглы.

Потери в секциях смесителя с наклонными каналами были определены по данным экспериментальных исследований. В частности для $n=8$ зависимость $\xi_{см}$ от исходного давления P_1 имеет вид

$$\xi_{см} = 0,092 \cdot P_1^2 - 1,736 P_1 + 19,69$$

Потери в цилиндрических каналах определяются по формулам

$$\Delta P_L = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \left(\frac{V_K^2 \cdot \rho}{2} \right)$$

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{\operatorname{Re}} + \frac{K_C}{d} \right)^{0,25}$$

Уравнение для определения параметров потока через блок смешения имеет вид

$$\frac{P_o \cdot m}{\rho} = \frac{P \cdot m}{\rho} + \frac{V^2 \cdot m}{2} + E_C$$

Или в параметрах давления

$$P_o = P_i + \frac{\rho \cdot V_i^2}{2} + (\xi_K + \xi_D + \xi_H + \xi_{см} + \xi_L) \frac{\rho \cdot V_i^2}{2}$$

Используя расчетные и экспериментальные данные можно определить параметры потока при заданном положении иглы.

В индивидуальной системе приготовления и восстановления СОЖ круглошлифовального станка применяются два модуля (рис.11). Первый для интенсивного перемешивания и введения добавок. Во

втором модуле выполняется кavitационная обработка эмульсии в специальных насадках.

При приготовлении эмульсии к насосу подключается емкость с водой (K1 открыт, K2 закрыт). Вода подается в смеситель, куда одновременно вводятся необходимые добавки. После заполнения эмульсией бака, до необходимого объема, Кран K1 закрывается и открывается кран K2. Далее эмульсия циркулирует через смеситель. Такая обработка продолжается до заданного уровня гомогенности. Контроль выполняется при отборе проб через кран K7.

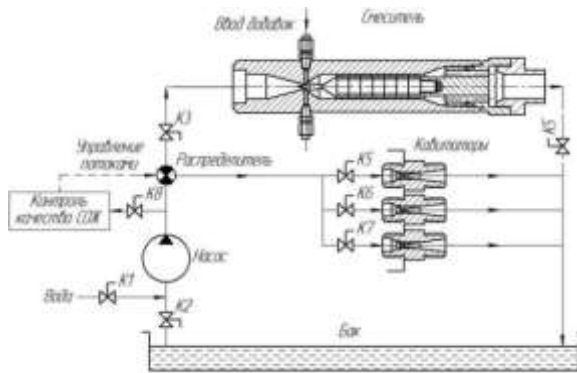


Рис. 11 – Индивидуальная система приготовления СОЖ

В дальнейшем, для получения мелкодисперсной эмульсии поток через распределитель направляется на кавитаторы. В зависимости от состава эмульсии и требуемой интенсивности кавитационного воздействия на рабочую среду подключаются кавитатор, соответствующий данному технологическому режиму. Готовая СОЖ подается на станок.

После использования СОЖ на технологических операциях шлифовального станка эмульсия снова отправляют в бак устройства для ее восстановления.

Выводы. При выполнении экспериментального исследования проточных активирующих систем была разработана установка, обеспечивающая по-

стоянство давления на входе измерительного устройства, что позволило исключить влияние характеристики насоса на результаты опытов. Проведенные исследования позволили получить данные, необходимые для разработки элементов перемешивания и кavitационных насадок проточных систем смешения и активации эмульсий. На основании расчетов и экспериментальных данных спроектирована установка для смешения и кavitационной обработки СОЖ в круглошлифовальном станке, позволившая повысить качество эмульсии.

Список литературы 1. Худобин Л.В. Смазочно-охлаждающие средства, применяемые при шлифовании. М.: Машиностроение, 1971. – 214 с. 2. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием. Справочник/ Под ред. С.Г.Энтелеса и Э.М.Берлинера. М.: Машиностроение, 1995. – 436 с. 3. Худобин Л.В., Семенов С.В. Влияние способа подачи СОЖ в зону правки на эффективность шлифования // Станки и инструмент. 1985. No 3. С. 19-20. 4. Федоткин И. М., Немчин А. Ф. Использование кавитации в технологических процессах, – Киев: Вища школа. Изд-во при Киевском ун-те. 1984. – 68 с. 5. Фесенко А.В., Лjubимый Ю.Н. Особенности обработки жидкостей в роторных активаторах. – Вестник НТУ ХПИ. Сборник научных работ. Тематический выпуск: Технологии в машиностроении. – Харьков: изд. НТУ «ХПИ». – 2013. No 1 С. 24-27 6. Федорец В.А. и др. Гидроприводы и гидропневмоавтоматика станков. Киев, Высш. шк., 1987. – 124 с. 7. Арзуманов Э.С. Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях. - М.: Энергия, 1978. –153 с.

Bibliography (transliterated): 1. Hudobin L.V. *Smazochno-ohlazhdajushchije sredstva, primenjaemye pri shlifovanii*. Moscow.: Mashynostroyeniye, 1971. 214P. Print. 2. *Smazochno-ohlazhdajushchije tehnologicheskije sredstva dlja obrabotki metallov rezaniem. Spravochnik. Pod redakciej P.G.Entelisa i E.M.Berlinera*. Moscow.: Mashynostroyeniye, 1995. 436P. Print. 3. Hudobin L.V., Semenov P.V. *Vlijanie sposoba podachi SOZH v zonu pravki na effektivnost shlifovania. Stanki i instrument*. 1985. No 3 pP. 19-20. Print. 4. Fedotkin I.M., Nemchin A.F. *Ispolzovanie kavitacii v tehnologicheskikh processah*. Kiev.: Higher school. 1984. 68P. Print. 5. Fesenko A.V., Ljubimyj U.N. *Osobennosti obrabotki zhidkostej v rotornykh aktivatorah*. Kharkov: NTU “KhPI”. 2013. No 1 pP. 24-27. Print. 6. Fedorec V.A. i dr. *Gidroprivody i gidropnevmoavtomatika stankov*. Kiev.: Higher school. 1987. 124P. Print. 7. Arzumanov E.P. *Kavitacija v mestnykh gidravlicheskih soprotivlenijah*. Moscow.: Energi, 1978. 153P. Print.

Поступила (received) 05.11.2015

Фесенко Анатолий Владимирович – канд. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»; тел.: (057)-720-66-25;
Fesenko Anatolij Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, Professor of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25;
Хицан Валерий Дмитриевич – док. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»; тел.: (057)-720-66-25;
Khytsan Valeryi Dmytryevych – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25;
Скидан Наталия Павловна – ст. преп., НТУ «ХПИ» тел.: (057)-720-66-25;
Skidan Nataliya Pavlovna – Senior Lecturer, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25.

УДК 621.9

А.А. ПЕРМЯКОВ, Ю.В. ТИМОФЕЕВ, И.Э. ЯКОВЕНКО**АНАЛИЗ КОМПОНОВОК СОВРЕМЕННЫХ АГРЕГАТНЫХ СТАНКОВ С ПОВОРОТНО-ДЕЛИТЕЛЬНЫМ БАРАБАНОМ**

В промышленно развитых странах основу высокоорганизованных производств составляет технологическое оборудование, создаваемое по агрегатно-модульному принципу. Созданием высокопроизводительных многопозиционных агрегатных станков занимаются ряд ведущих станкостроительных фирм, перспективные компоновки некоторых из них рассмотрены в данной статье. Выполнен обзор современных многопозиционных агрегатных станков с горизонтальной осью транспортирования заготовки в процессе обработки. Рассмотрены технические характеристики, технологические возможности и особенности компоновки.

Ключевые слова агрегатный станок, компоновка, поворотный-делительный барабан.

Введение.

Современные станки и системы должны обладать высоким уровнем автоматизации и производительности обработки, технологической гибкостью, обеспечивать возможно низкую себестоимость обработки деталей, иметь малый срок окупаемости капитальных вложений. Наиболее перспективным видом технологического оборудования, удовлетворяющим большинству требований, являются агрегатные станки и технологические системы, создаваемые по агрегатно-модульному принципу.

Анализ публикаций в зарубежных периодических изданиях, а также поиск информации в Интернет показал, что в промышленно развитых странах основу высокоорганизованных производств составляет технологическое оборудование, создаваемое по агрегатно-модульному принципу. Созданием высокопроизводительных многопозиционных агрегатных станков (rotary transfer machines) и автоматических линий (transfer line machines) занимаются ряд ведущих станкостроительных фирм. Перспективные компоновки некоторых из них рассмотрены в данной статье-обзоре.

Анализ последних достижений и литературы.

Современное технологическое оборудование образует большое множество разнообразных компоновочных схем. В процессе развития технологии машиностроения, как науки, и в частности теории производительности, именно необходимость реализации различных структур выполнения технологических операций привело от простых одношпиндельных одноинструментных компоновок станков к компоновкам сложной структуры. Высокопроизводительные структуры конструктивно нашли свое воплощение в агрегатных станках (АС) и автоматических линиях (АЛ).

Многолетняя практика создания и эксплуатации станков сложной структуры постоянно указывает на то, что правильный выбор и рациональное построение компоновки оказывает большое влияние на их качество. Во многих случаях создания специальных и универсальных станков это влияние оказывается решающим. В литературе немало работ, в той или иной мере посвященных или связанных с вопросами компоновки металлорежущего оборудования [1, 2, 3].

Первая систематизация многообразия компоновок агрегатных станков и автоматических линий с критическим рассмотрением их технических и экономических показателей сделана в книге Х.Гёбеля [4]. В качестве классификационных признаков для обозначения компоновок агрегатных станков Х.Гёбель предложил использовать основное направление подачи (горизонтальное Н, вертикальное V), тип направления подачи (параллельно оси инструмента, перпендикулярно оси инструмента), радиально и перпендикулярно оси инструмента), транспортировочное перемещение заготовок (шаговое, непрерывное), число сторон обработки, траекторию транспортирования заготовок (прямолинейная G, круговая K). На основе возможных комбинаций классификационных признаков составлена систематизационная таблица базовых и специальных компоновок, а также приведены примеры возможных практически важных (реализованных) компоновок. Систематизационная таблица компоновок по Х.Гёбелю прошла проверку временем и может быть успешно использована для анализа компоновок современных агрегатных станков.

Цель работы, постановка проблемы. Целью работы является анализ современных компоновочных решений многопозиционных агрегатных станков. Особый интерес вызывают компоновки с горизонтальной осью кругового транспортирования заготовки, достоинством которых является возможность многосторонней обработки на каждой рабочей позиции станка. Использование в качестве транспортной системы многопозиционного поворотного-делительного барабана позволяет выполнять трехстороннюю обработку несимметричных деталей с высоким уровнем концентрации и дифференциации операции.

Материалы исследований. Для достижения поставленной цели были рассмотрены компоновки агрегатных станков с поворотным-делительным барабаном различных производителей. Прототипом таких станков является описанный в книге Х.Гёбеля станок соответствующей компоновки (рис.1). Поиск информации в Интернет по соответствующим ключевым словам позволил установить нескольких производителей такого оборудования. Ниже приведены результаты такого информационного поиска.

Известно, что традиционно производству агрегатных станков большое внимание уделяется в Италии,

где по разной оценке доля такого оборудования составляет 6-7% станкостроения страны. Поиск в итальянском сегменте Интернет позволил найти информацию о следующих моделях и производителях интересующих нас станков.

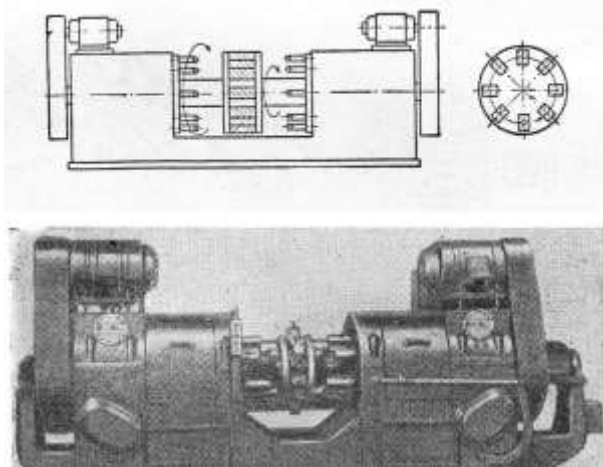


Рис. 1 - Компоновка агрегатного станка с несколькими горизонтальными головками и вертикальным круговым перемещением заготовок

Итальянская фирма VIGNOTTO [5], которая специализируется на выпуске современных агрегатных станков и другого специального металлообрабатывающего оборудования на своем сайте <http://www.vignotto.it> представляет высокопроизводительные агрегатные станки с горизонтальным и вертикальным перемещением заготовок. Станки главным образом предназначены для массового производства гидро- и пневмосоединений, различных клапанов, фитингов и автомобильных запчастей.

Интересной моделью фирмы VIGNOTTO является агрегатный станок модели Vi03 (рис. 2) с поворотным барабаном, который предназначен для массового производства нетрудоемких деталей. Заявлено, что его производительность может достигать до 2000 деталей в час.

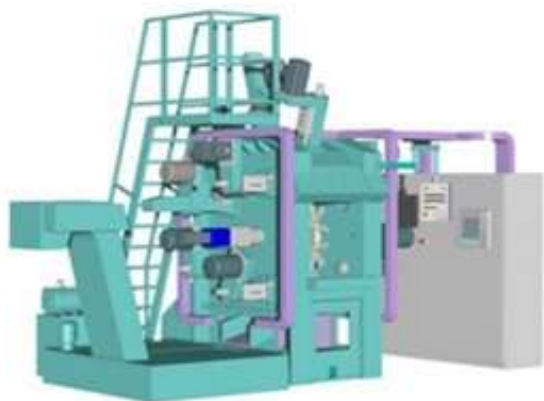


Рис. 2 - Компоновка агрегатного станка с поворотным барабаном VIGNOTTO Vi03

VIGNOTTO Vi03 оснащен десятипозиционный поворотным барабаном, что соответствует одной кон-

трольной, одной загрузочно-разгрузочной, и восьми рабочим позициям. Все агрегаты станка смонтированы на станине, и расположены перпендикулярно к поворотному барабану, как с левой, так и с правой стороны от него, что позволяет обрабатывать деталь с нескольких сторон. Так же, в зависимости от конкретной детали, может быть установлено несколько рабочих узлов радиально к поворотному барабану, что позволяет обрабатывать деталь ещё с одной стороны. В качестве зажимного устройства используется стандартный одноместный самоцентрирующий патрон. VIGNOTTO Vi03 является станком-автоматом, для загрузки-разгрузки деталей используется робот-манипулятор, который обладает функцией «технического зрения». Заготовки к роботу поступают посредством вибробункера и ленточного конвейера. Станок также оснащен конвейером для транспортирование стружки. Технические характеристики VIGNOTTO Vi03 приведены в табл.1.

Таблица 1 - Технические характеристики АС VIGNOTTO Vi03

Станина	сварная конструкция
Количество силовых узлов	23
Поворотный барабан	
ось	горизонтальная
количество позиций	10
двигатель привода	бесщеточный серводвигатель с высокоточным редуктором
время поворота стола	0,5-0,8с (в зависимости от массы заготовки)
Система ЧПУ	
тип серводвигатели/приводы	BECKHOFF
ПК / дисплей	Danaher Motion
	Промышленный ПК компании BECKHOFF с 12,1" ЖК-дисплеем и IP65 клавиатурой
Количество устанавливаемых ЧПУ модулей	
левая сторона	9
правая сторона	9
радиально	5
всего	23
Стандартный шпиндель	
тип	F95-40
диаметр корпуса	95 мм
номинальный ход пиноли	135 мм
привод	асинхронный векторный привод
мощность двигателя	до 7,5 кВт
скорость вращения шпинделя	4 фиксированные скорости или плавное регулирование с векторным преобразованием частоты
Габариты станка	
длина	5950 мм
ширина	2600 мм
высота	3500 мм

Ещё одним итальянским производителем современных АС является фирма Picchi [6], которая входит в состав Bugatti Group, на своем сайте <http://www.picchimachines.it> производитель предоста-

влет информацию о множестве АС, одним из них является современный агрегатный станок для обработки фитингов TR 6-9/OSE (рис. 3).



Рис. 3 – Компонка агрегатного станка с поворотно-делительным барабаном Picchi TR 6-9/OSE

При проектировании станка инженеры за основу взяли классическую компоновку. Станок оборудован поворотно-делительным барабаном с блокирующим устройством Hirth на 6 установочных мест. Поворотно-делительный барабан приводится в движение двигателем Brushless и особо точным редуктором с эпициклоидным зацеплением. Время поворота барабана на одну позицию составляет лишь 0,35 сек., полный цикл 0,45 сек. Поворотно-делительный барабан может быть оснащен двухместным зажимным устройством, для одновременной обработки двух деталей, то есть при необходимости может одновременно обрабатываться до 12 заготовок.

Все силовые агрегаты станка смонтированы на высокопрочной монолитной станине прямоугольной формы. Общее число агрегатов равно 9, из них 6 расточных, и 3 резбонарезных.

Шесть расточных агрегатов типа U.F.E. 125 (ISO 40) с ходом шпинделя 125 мм и диаметром пиноли 100 мм обеспечивают высокую точность благодаря использованию шариковинтовой передачи от двигателя Brushless. Регулирование пропускной способности осуществляется посредством электроклапана. Также есть возможность бесступенчатой регулировки скорости подвода инструмента для каждой установки: быстрый подвод, медленный подвод, очень медленный подвод, быстрый отвод. Подвод контролируется специальным линейным потенциометром.

Три резбонарезные агрегата для нарезания резьбы метчиком типа U.M.P. 80 (ISO 40) с ходом 80 мм. Подача ходового винта осуществляется двигате-

лем Brushless. Подвод инструмента контролируется специальным линейным потенциометром.

Многоспindleльная головка может быть установлена на любую из позиций, это обуславливается особенностями обрабатываемой детали.

Автоматическая загрузка и разгрузка деталей осуществляется посредством робота-манипулятора.

Пульт управления с ЧПУ Siemens 840D и персональный компьютер с операционной системой Windows 98 используется для сохранения программ работы и самообучения, а также для управления отдельно каждым силовым узлом АС.

Производительность станка при нетрудоемких деталях может достигать 3600 - 4000 деталей в час.

Итальянская фирма Porta Solutions [7], на сайте <http://www.porta-solutions.com> представляет несколько различных систем, в том числе TRANSFER TRO барабанной компоновки (рис. 4, 5).



Рис. 4 – Общий вид АС барабанной компоновки фирмы Porta Solutions

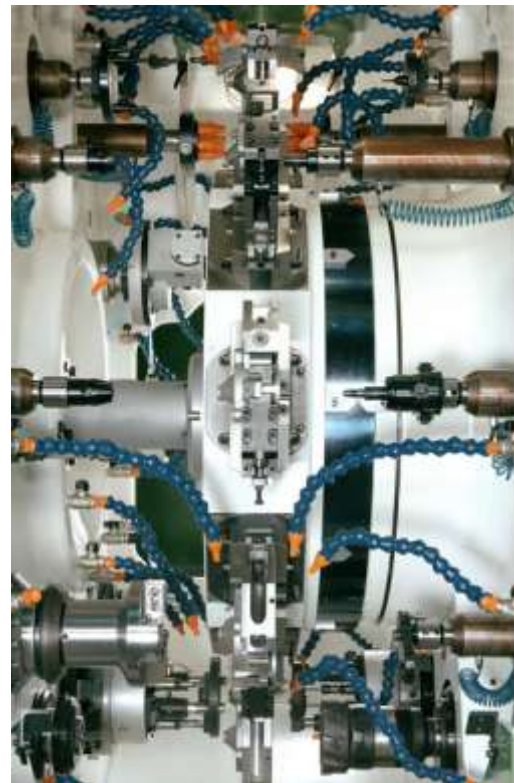


Рис. 5 – Общий вид поворотно-делительного барабана фирмы Porta Solutions

Модель TRANSFER TRO относится к числу наиболее традиционных современных АС барабанного типа с горизонтальной осью вращения. TRANSFER TRO подходит для обработки деталей по 2 или 3 осям. Станок может быть оснащен от 4 до 8 зажимными устройствами, что соответствует индексации поворотного барабана, и от 4 до 21 рабочими станциями.

Рабочие станции и поворотный делительный барабан контролируются с помощью ЧПУ модуля.

В TRANSFER TRO обрабатывающие узлы используются исключительно с шариковой винтовой передачей производства фирмы FMU® (рис. 6). Этот выбор фирма Porta Solutions объясняет возможностью существенного сокращения трения, достижения высокой скорости движений и повторяемой точности, а также устранения таких недостатков как: фильтрация и утечки масла. Также такие силовые узлы гарантируют высокую надежность по сравнению с традиционными гидравлическими или сервоклапанными узлами.



Рис. 6 – 3-D модель рабочего модуля с ЧПУ

Фирма Porta Solutions использует безщеточный, управляемый от ЧПУ модуля поворотный делительный барабан (рис. 7, 8). Диаметр барабана составляет 2300 мм, а время поворота на одну позицию составляет всего 0,16 секунды. Количество позиций барабана может варьироваться от 4 до 8, в зависимости от обрабатываемой детали. Количество одноместных гидравлических зажимных устройств соответствует количеству позиций стола.

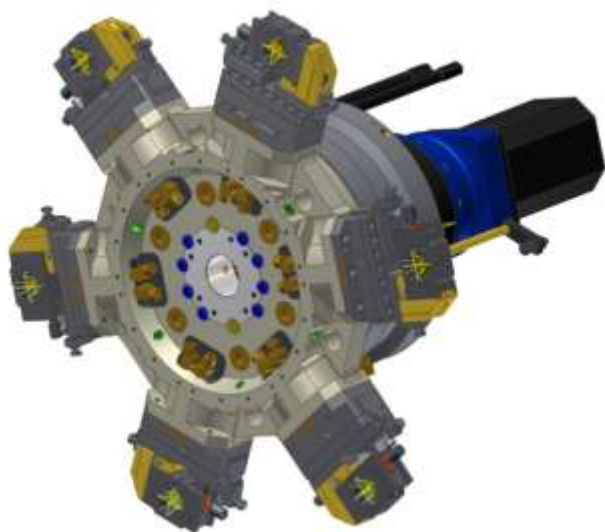


Рис. 7 – 3-D модель поворотного делительного барабана с ЧПУ фирмы Porta Solutions

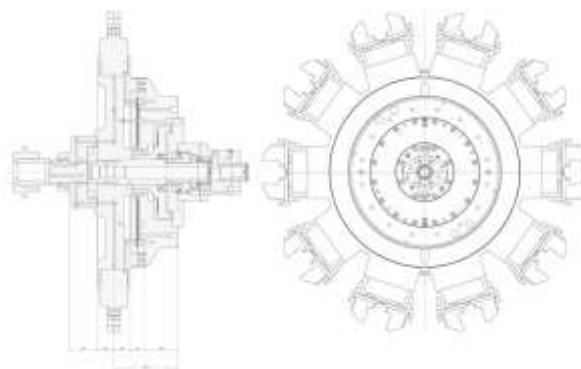


Рис. 8 – Компоновка поворотного делительного барабана АС модели TRANSFER TRO фирмы Porta Solutions

Станина в TRANSFER TRO (рис. 9, 10) состоит из толстых стальных листов, и имеет сварную конструкцию, что обеспечивает необходимую жесткость и виброустойчивость. Эргономический дизайн станины способствует легкому доступу оператору ко всем элементам станка.

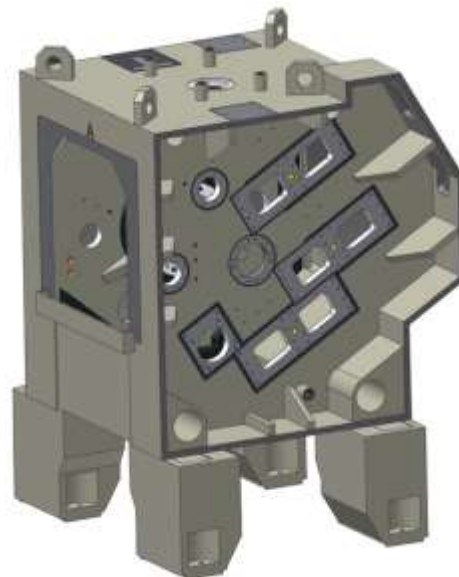


Рис. 10 – 3-D модель станины фирмы Porta Solutions

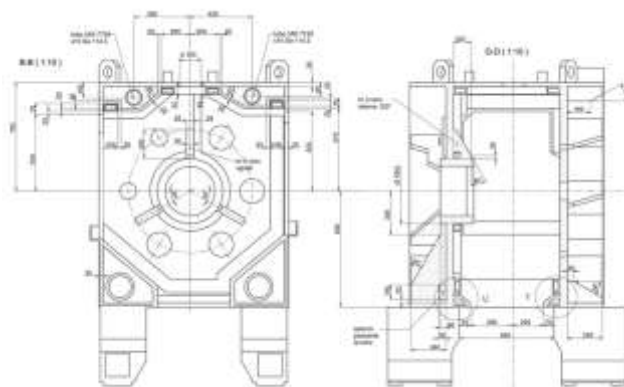


Рис. 10 – Станина АС TRANSFER TRO фирмы Porta Solutions

Двухкоординатный агрегатный станок итальянского производства ВТВ TRO [8] 10S-12U HSK63 CN

–EL (рис. 11) представлен на сайте компании ww2.btb.it. Данный станок предназначен для обработки стальных деталей различных размеров и форм для автомобильной промышленности, позволяет выполнить полную обработку изделия при высокой производительности.



Рис. 11 – Общий вид AC барабанной компоновки фирмы ВТВ

Станок состоит из 10-ти позиционного поворотного барабана, где первая рабочая станция – загрузочная, восемь рабочих станций, и десятая – разгрузочная позиция с устройством пневматической выгрузки и шарнирным ленточным транспортером.

Технологическая система может быть оснащена 17 обрабатывающими узлами, из которых:

- 11 токарных электромеханических блоков с ЧПУ, 5 из которых оснащены системой охлаждения под высоким давлением, рабочий ход составляет 135 мм;
- 1 сверлильно-фрезерный электромеханический блок, с ЧПУ, рабочий ход 135 мм;
- 3 расточные электромеханические головки с ЧПУ, ход каретки 12 мм;
- 2 гидравлических протяжных блока с ЧПУ.

На сайте www.winema.de представлен многопозиционный агрегатный станок с ЧПУ немецкого производства [9] WINEMA RV20 Flexmaster (рис. 12).



Рис. 12 – Компоновка агрегатного станка WINEMA RV20 Flexmaster

На станке можно обрабатывать заготовки диаметром от 4 до 30 мм, заготовки в виде прутка до 42 мм. WINEMA RV20 Flexmaster имеет восьмипозиционный поворотный барабан, который имеет горизонтальную ось вращения. Для обработки заготовки может использоваться максимально до 14 осевых (7 слева и 7 справа) и 3-х радиальных узлов. Все узлы станка оборудованы ЧПУ модулем, что позволяет программировать каждый узел отдельно, к тому же их можно легко перепрограммировать под новую деталь, что делает данный станок очень гибким.

На первую рабочую позицию заготовка в виде прутка и труб (диаметром до 42 мм) попадает посредством специального транспортировочного устройства, где она зажимается в стандартном цанговом зажимном патроне, на этой же первой позиции происходит операция отрезания, и далее заготовка транспортируется по технологическому циклу на поворотно-делительном барабане. Максимальная длина заготовки может достигать 180 мм. Заготовки другой формы в зону резания подаются с помощью роботоманипулятора. Технические характеристики AC WINEMA RV20 Flexmaster приведены в табл.2.

Таблица 2 – Технические характеристики AC WINEMA RV20 Flexmaster

Максимальный диаметр заготовки (прутка)	42 мм
Максимальная длина стороны заготовки некруглой формы	50 мм
Максимальная длина заготовки	180 мм
Количество позиций барабана	8
Производительность, шт/час	60 - 3000
Количество обрабатывающих узлов	17 (14 осевых, 3 радиальных)
Максимальный ход стандартной обрабатывающей станции	90 мм
Система ЧПУ\	Siemens 840 D
Вес (зависит от комплектации)	8500 кг

Турецкая фирма TTM Makine San ve Tic.Ltd.Şti [10] на своем сайте <http://www.cnctransfer.com> представила модель агрегатного станка CNC-F1-TWINPLUS с высокой степенью гибкости и точностью обработки (рис. 13).

Этот станок оснащен двенадцатипозиционным поворотно-делительным барабаном с горизонтально расположенными рабочими узлами справа и слева от него (11 слева, 11 справа), 12-я позиция используется для загрузки/разгрузки деталей. На каждой из 12 позиций поворотно-делительного барабана установлено двухместное зажимное приспособление, что позволяет обрабатывать одновременно по 2 детали. Зажимные приспособления приводятся в действие от маломощных гидравлических или пневматических станций. Каждая рабочая станция оснащена шпинделем с сервоприводом, поэтому они способны работать на высоких скоростях с высокой точностью. Для достижения максимальной производительности станок способен работать в интеграции с двумя роботами FANUC 200IC или MITSUBISHI RV-6SQ. Производи-

тельность станка, в зависимости от обрабатываемой деталь, может достигать до 2400 деталей в час.



Рис. 13 – Общий вид АС барабанной компоновки фирмы TWINPLUS

Выводы

Современные агрегатные станки существенно отличаются от своих предшественников, хотя главные идеи этих станков и систем остались прежними: высокие показатели производительности и как следствие низкая технологическая себестоимость обработки деталей; высокий уровень автоматизации; агрегатно-модульный принцип построения; высокий уровень унификации узлов и агрегатов; кратчайшие сроки

проектирования и изготовления; невысокая стоимость оборудования и быстрая его окупаемость.

Главным отличием и преимуществом современных агрегатных станков является технологическая гибкость и высокие показатели производительности (для несложной обработки до 3000 дет/час).

Список литературы: 1. Аверьянов О.И. Модульный принцип построения станков с ЧПУ. – М: Машиностроение, 1987. – 232 с.; 2. Агрегатные станки средних и малых размеров /Ю.В.Тимофеев, В.Д.Хицан и др. // Под общ. ред. Ю.В.Тимофеева. - М.: Машиностроение, 1985. - 248 с.; 3. Врагов Ю.Д. Анализ компоновок металлорежущих станков: (Основы компонетики). – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.; 4. Гебель Х. Компоновка агрегатных станков и автоматических линий. //Пер. с нем. – М.: ГНТИМЛ, 1959. – 189 с.; 5. «VIGNOTTO» // <http://www.vignotto.it>, 28.02.2014 г.; 6. «Picchi» // <http://www.picchimachines.it>, 10.03.2014 г.; 7. «Porta Solutions» // <http://www.porta-solutions.com>, 15.03.2014 г.; 8. «BTB TRO» // www2.btb.it, 20.03.2014 г.; 9. «WINEMA» // www.winema.de, 04.03.2014 г.; 10. «TTM Makine San ve Tic.Ltd.Şti» // <http://www.cnctransfer.com>, 28.03.2014 г.

Bibliography (transliterated): 1. Aver'janov O.I. Modul'nyj princip postroenija stankov s ChPU. – Moscow: Mashinostroenie, 1987. – 232 P.; 2. Agregatnye stanki srednih i malyh razmerov /Ju.V.Timofeev, V.D. Hican i dr. // Pod obshh. red. Ju.V.Timofeeva. - Moscow: Mashinostroenie, 1985. - 248 P. 3. Vragov Ju.D. Analiz komponovok metallorazhushhih stankov: (Osnovy komponetiki). – Moscow: Mashinostroenie, 1978. – 208 P. 4. Gjobel' H. Komponovka agregatnyh stankov i avtomaticheskikh linij. //Per. s nem. – Moscow: GNTIML, 1959. – 189 P. 5. «VIGNOTTO» // <http://www.vignotto.it>, 28.02.2014 g.; 6. «Picchi» // <http://www.picchimachines.it>, 10.03.2014 g.; 7. «Porta Solutions» // <http://www.porta-solutions.com>, 15.03.2014 g.; 8. «BTB TRO» // www2.btb.it, 20.03.2014 g.; 9. «WINEMA» // www.winema.de, 04.03.2014 g.; 10. «TTM Makine San ve Tic.Ltd.Şti» // <http://www.cnctransfer.com>, 28.03.2014 g.

Поступила (received) 14.11.2015

Пермяков Александр Анатольевич – док. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ», тел.: (057)-707-66-25, e-mail: perm_a@i.ua;

Permiakov Aleksandr Anatolievych – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25; , e-mail: perm_a@i.ua;

Тимофеев Юрий Викторович – док. техн. наук, проф., зав. кафедрой «Технология машиностроения и металлорежущие станки» НТУ «ХПИ», тел.: (057)-720-66-25;

Тимофеев Yurii Vyktorovych – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department «Technology of mechanical engineering and machine tools», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25;

Яковенко Игорь Эдуардович – канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ», тел.: (057)-707-66-25, e-mail: igor.dych59@gmail.com;

Yakovenko Yhor Eduardovych – Candidate of Technical Sciences, Docent, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25; e-mail: igor.dych59@gmail.com.

УДК 621.9

А.А. КЛОЧКО, М.И. ГАСАНОВ, Е.В. БАСОВА

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ И ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ В ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧАХ

В статье рассмотрены условия контактирования цилиндрических зубчатых передач и технологические методы воздействия при формировании эвольвентной поверхности зубьев при которых происходит проскальзывание зубьев одной шестерни относительно профиля зуба сопрягаемого колеса и сил трения-скольжения. Потеря энергии на трение в зубчатых передачах доходит до 10% от всей потери энергии на преодоление трения. В зубчатой передаче потеря энергии происходит в зубьях вследствие их трения при несоответствии точности и изготовления зубчатых передач по нормам кинематической точности, нормам плавности, нормам бокового зазора согласно требованиям ГОСТ1643-81 и особенностью трибологического контактирования эвольвентных сопрягаемых поверхностей. Показано, что при силовых расчетах цилиндрических зубчатых колес необходимо учитывать помимо динамических нагрузок и усилия трения качения-скольжения в зубчатых передачах. В зубчатых цилиндрических передачах трение качения значительно меньше трения скольжения, поэтому одной из преуваляющих научных направлений является уменьшение и сведение до минимума участка скольжения сопрягаемых эвольвентных профилей зубчатых колес с учетом изменения параметров состояния поверхностного слоя зубьев: шероховатости, волнистости, твердости, физико-механических свойств материала зубчатых колес.

Ключевые слова: трибология, контактирование, зубчатые передачи, технологическое воздействие, формообразование, трение качения-скольжения.

Введение.

В цилиндрической зубчатой передаче, даже при идеальном эвольвентном зацеплении происходит проскальзывание профиля зуба одной шестерни относительно профиля зуба сопрягаемого колеса. Вследствие этого проскальзывания возникает сила трения скольжения, значение которой пропорционально нормальному давлению в зубьях шестерен. Нормальное давление, в свою очередь, пропорционально передаваемому усилию. Сила трения в процессе зацепления меняет свой знак при прохождении точки зацепления через полюс зацепления, однако среднее значение момента, создаваемого этой силой, в процессе зацепления всегда имеет знак, противоположный угловой скорости. Кроме того, в разных фазах зацепления находятся одновременно несколько зубьев.

Основная часть

Вопрос о природе трения зубчатых передач сих пор изучен недостаточно. Как показывают экспериментальные исследования, трение представляет собой сложный комплекс механических, физических и химических явлений, причем те или иные явления преобладают в зависимости от условий, при которых происходит процесс трения и видов применяемых смазок.

Обычно различают два основных вида трения: трение сухое (или трение несмазанных поверхностей) (рис. 1) и трение жидкостное (или трение смазанных

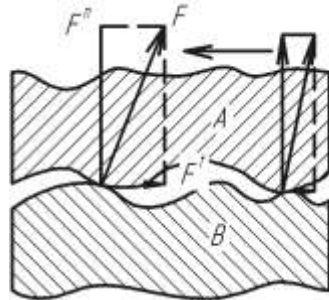


Рис. 1 – Увеличенное изображение ввух трущихся поверхностей

поверхностей) (рис. 2). Кроме того, различают иногда еще два промежуточных вида трения: полусухое трение и полужидкостное трение.

Явление сухого трения может быть объяснено схематически следующим образом. Рассматривая под большим увеличением поверхности трущихся тел, можно обнаружить, что эти поверхности не абсолютно гладкие, а шероховатые и покрыты большим количеством неровностей. На рис. 1 схематически изображены трущиеся поверхности *A* и *B*. Если эти поверхности двигать друг относительно друга, то выступы одной поверхности будут задевать за выступы другой поверхности. Выступы будут деформироваться. Деформации эти могут быть упругими и неупругими в зависимости от величины нагрузки, приложенной к трущимся поверхностям, скорости относительного движения, различных физических свойств трущихся тел (упругость, характер поверхностей и т. д.).

Если в точках касания приложить опорные реакции F , направленные по нормали к элементарным площадкам соприкосновения (рис. 1), и разложить их на составляющие, перпендикулярные и параллельные направлению движения, то нормальные составляющие F^n будут уравниваться заданными нормальными нагрузками, а касательные составляющие F^t в сумме создадут некоторую силу сопротивления относительному перемещению поверхностей *A* и *B*. Эта сила сопротивления и является силой трения.

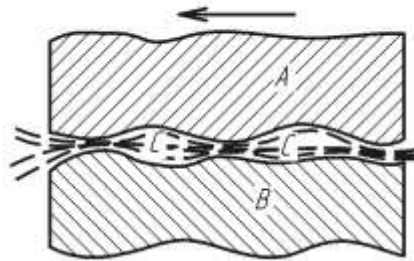


Рис. 2 – Увеличенное изображение ввух трущихся поверхностей, разделенных слоем смазки

Если выступающие неровности поверхностей A и B непосредственно соприкасаются друг с другом, то такой вид трения называется *сухим трением*. Если же между поверхностями A и B имеется промежуточный слой смазки (рис. 2) и поверхности A и B непосредственно не соприкасаются, то такой вид трения называется *жидкостным трением*. Поэтому при жидкостном трении силами трения являются силы сопротивления сдвигу отдельных слоев смазки. Многие из различных явлений, которые имеют место при жидкостном трении, отсутствуют при сухом трении, и наоборот. Полусухим трением называют такой вид трения, при котором наиболее выступающие шероховатости не разделяются слоем смазки и приходят в непосредственное соприкосновение. Разница между полусухим и полужидкостным видами трения заключается главным образом в том, какой из основных видов трения преобладает.

Явления сухого и жидкостного трения по своей природе совершенно различны. Поэтому различны и методы учета сил трения в механизмах. В открытых зубчатых передачах наблюдается сухое трение; в подшипниках – жидкостное трение, переходящее иногда в полусухое или даже сухое трение (периоды пуска редукторов). В закрытых зубчатых передачах имеет место и трение качения и трение скольжения.

По видам относительного движения различают: трение скольжения – внешнее трение при относительном скольжении соприкасающихся тел и трение качения (сопротивление перекачиванию) – внешнее трение при относительном качении соприкасающихся тел.

При рассмотрении относительного движения элементов звеньев, входящих в высшие пары, мы встречаемся не только со скольжением одного элемента относительно другого, но и с качением элементов друг по другу. В том случае, когда элементы звеньев являются центроидами или аксоидами, имеет место чистое качение элементов без скольжения; в том же случае, когда элементы являются взаимоогнбаемыми кривыми или эвольвентными поверхностями, имеет место качение и скольжение. Представим эвольвентное зацепление сопрягаемых цилиндрических зубчатых колес как пару с взаимоогнбаемыми кривыми (рис. 3).

Пусть элементы a и b (рис. 3.б) высшей кинематической пары плоского механизма представляют собой две взаимоогнбаемые кривые. Проведем нормаль $n-n$ к профилям a и b . Эта нормаль проходит через точку C касания профилей и пересекает линию AB , соединяющую центры вращения A к B , в точке P . Точка P – мгновенный центр вращения в относительном движении звена A относительно звена B . Скорость v_{21} звена 2 относительно звена 1 будет скоростью скольжения, направленной вдоль касательной $t-t$ и равной

$$v_{21} = |\Omega|(P_0C), \quad (1)$$

где Ω – мгновенная угловая скорость в относительном движении, абсолютная величина которой равна

$$|\Omega| = |\omega_1| + |\omega_2|. \quad (2)$$

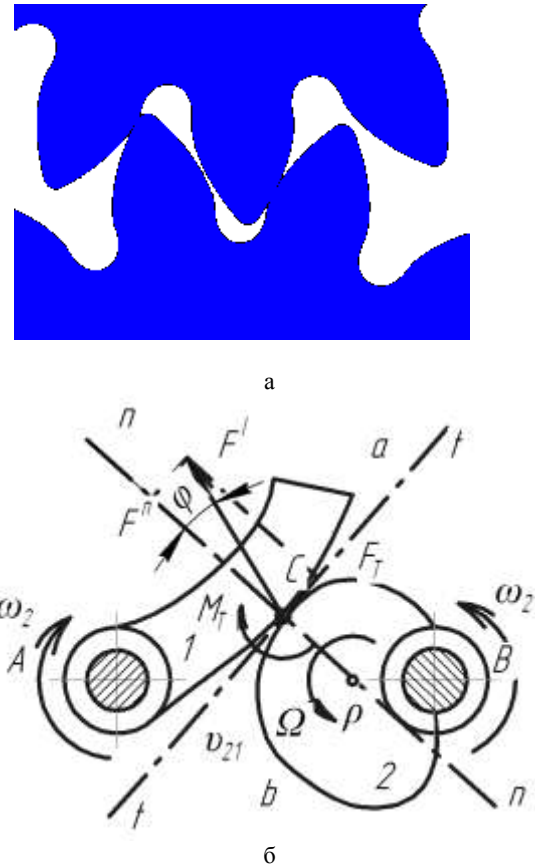


Рис. 3. – Относительное движение элементов звеньев, входящих в высшие пары:
а – эвольвентное зацепление; б – пара с взаимоогнбаемыми кривыми

Полная реакция F' звена 2 на звено 1 приложена к точке касания C звеньев и отклонена от направления общей нормали на угол трения ψ в сторону, противоположную вектору относительной скорости скольжения v_{21} . Величина силы трения F_T , приложенной к звену 1, определяется по формуле

$$F_T = fF^n, \quad (3)$$

где f – коэффициент трения скольжения.

Сопротивление, возникающее при перекачивании элементов пар друг по другу с угловой скоростью Ω , может быть учтено введением момента трения качения M_c (рис. 3.б), направление которого противоположно угловой скорости Ω .

Физические явления, вызывающие момент трения качения M_T , изучены мало, в технических расчетах пользуются в основном данными, полученными при экспериментах, проводимых над различными конкретными цилиндрическими зубчатыми передачами шпиндельных бабок тяжелых токарных станков с ЧПУ, приводами суппортов, приводов машин.

Многочисленные эксперименты показывают, что сопротивление перекачиванию зависит от упругих свойств материалов соприкасающихся эвольвентных поверхностей цилиндрических зубчатых колес, кривизны соприкасающихся поверхностей и величины

прижимающей силы. На преодоление сопротивлений при перекачивании зубчатых колес тратится работа. Работа эта расходуется на деформацию поверхностей касания. Пусть, например, имеется неподвижный цилиндр, лежащий на плоскости (рис. 4) и нагруженный некоторой силой F .

В зоне касания цилиндра и плоскости возникает местная деформация контактного сжатия на площадке шириной b . Согласно положениям теории упругости напряжения приближенно могут быть приняты распределенными по эллиптическому закону. При этом кривая распределения напряжений симметрична и, следовательно, линия действия равнодействующей F' этих напряжений совпадает с линией действия силы F .

Начнем перекачивать цилиндр (рис. 5). Тогда участок ac площадки контактного сжатия будет находиться в зоне нарастающих деформаций, а участок ae – в зоне исчезающих деформаций.

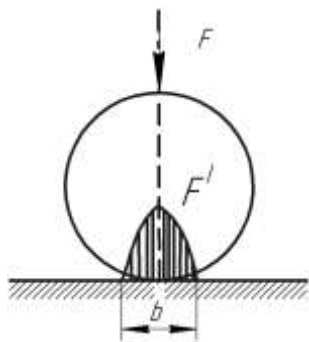


Рис. 4 – Эпюра напряжений контактного сжатия на деформированной площадке цилиндра

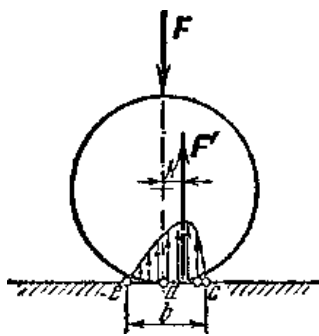


Рис. 5 – Искаженная форма эпюры напряжений контактного сжатия, получающаяся при перекачивании цилиндра

Из-за внутреннего трения в материале имеет место несовпадение кривых нагрузки и разгрузки материала (явление упругого последствия или гистерезиса). Поэтому кривая напряжений в области нарастающих деформаций выше кривой в области исчезающих деформаций. Следовательно, распределение напряжений по площадке b оказывается несимметричным с максимумом, сдвинутым в сторону движения. Равнодействующая F' напряжений смещена

вправо от точки a на величину k . Величину k называют плечом силы трения качения. При качении необходимо преодолеть некоторый момент M_T , называемый моментом трения качения, величина которого равна

$$M_T = Fk. \quad (4)$$

Здесь коэффициентом пропорциональности является плечо момента трения качения k , которое называется также коэффициентом трения качения.

Пусть под действием внешней силы F'' (рис. 6), приложенной в точке O , цилиндр A равномерно перекачивается без скольжения по плоскости B . Равномерное перекачивание цилиндра происходит под действием пары сил F'' и F_0 , где F_0 – сила трения скольжения, приложенная в точке C и равная по величине силе F'' . Сила F_0 есть сила трения покоя, равная по величине $F_0 \leq Ff_n$, где f_n – коэффициент трения покоя, или как его называют в этих случаях – коэффициент сцепления цилиндра с плоскостью. Пара сил, под действием которой цилиндр A перекачивается по плоскости, имеет момент $M = F''r$, где r есть радиус цилиндра.

При равномерном качении цилиндра этот момент M равен по абсолютной величине моменту сопротивления перекачиванию, т. е. моменту трения качения

$$F''r = M_T = Fk. \quad (5)$$

Из равенства (5) следует, что величина силы F'' прямо пропорциональна коэффициенту трения качения и обратно пропорциональна радиусу цилиндра.

Коэффициент трения качения обычно измеряется в миллиметрах.

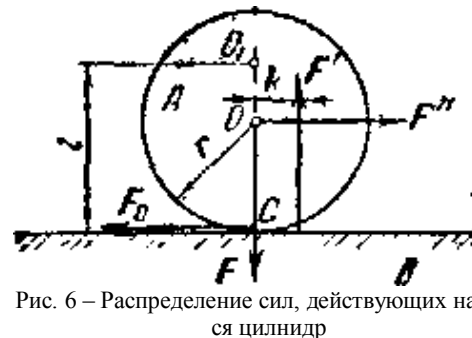


Рис. 6 – Распределение сил, действующих на катящийся цилиндр

Под действием силы F'' (рис. 6) при одних условиях цилиндр может перекачиваться, а при других – скользить.

Рассмотрим, при каких условиях наблюдается трение качения и при каких трение скольжения. Пусть цилиндр A перемещается равномерно по плоскости B под действием силы F'' , приложенной в центре O и параллельной плоскости B (рис. 6). Если нормальное давление в точке C касания равно F , то сопротивление трения скольжения F_0 равно

$$F_0 = f_{\Pi}F, \quad (6)$$

и, следовательно, чтобы цилиндр равномерно скользил по плоскости, необходимо, чтобы величина силы F'' была равна

$$F'' = f_{\Pi} F. \quad (7)$$

Условие равномерного качения определяется равенством

$$F'' r = k F. \quad (8)$$

Чтобы цилиндр только скользил по плоскости, необходимо, чтобы кроме условия $F'' = f_{\Pi} F$ удовлетворялось еще условие

$$F'' r < k F, \quad (9)$$

откуда

$$F f_{\Pi} r < k F, \text{ или } f_{\Pi} = \frac{k}{r}. \quad (10)$$

Чтобы цилиндр только перекачивался по плоскости, необходимо, чтобы, кроме условия $F'' r = k F$, удовлетворялось еще условие

$$F'' < f_{\Pi} F. \quad (11)$$

Откуда

$$f_{\Pi} > \frac{k}{r} \quad (12)$$

Если сила F'' приложена не в точке O цилиндра (рис. 6), а в какой-либо другой точке, например в точке O_1 находящейся на заданном расстоянии l от плоскости, необходимо во всех выведенных соотношениях величину r заменять величиной l . Так как на практике работа сопротивлений перекачиванию почти всегда меньше работы сопротивлений трению скольжения.

При трении качения сопрягаемых эвольвентных поверхностей зубья перекачиваются один по другому без скольжения и поверхности их касаются друг друга только по линии или в одной точке, причем по мере контактного перекачивания зубьев линия зацепления или точка касания все время сменяется новой, что наблюдается, например, при перекачивании (без скольжения) зубьев колес в цилиндрической зубчатой передаче на определенном участке (рис. 7).

В зубчатых передачах как раз и сочетаются: трение качения-скольжения-качения в зоне делительного диаметра на участке эвольвентного профиля (рис. 8)

$$h = \pm 0,3m, \quad (13)$$

где m -модуль зубчатой передачи.

Зубчатые передачи в приводах машин, высокоточных тяжелых токарных станках с ЧПУ находят

применение в шпиндельного узлах, механизмов перемещения суппортов, задних бабок.

Используя тот или иной механизм, мы совершаем работу, всегда превышающую ту, которая необходима для достижения поставленной цели. В соответствии с этим различают полную или затраченную работу A_z и полезную работу A_n . Если, например, наша цель – поднять груз массой M_0 на высоту H , то полезная работа – это та, которая обусловлена лишь преодолением силы тяжести, действующей на груз. При равномерном подъеме груза, когда прикладываемая нами сила равна силе тяжести груза, эта работа может быть найдена следующим образом:

$$A_n = F_{mh} = M_0 g H. \quad (14)$$

Если же мы применяем для подъема груза блок или какой-либо другой механизм, то, кроме силы тяжести груза, нам приходится преодолевать еще и силу тяжести частей механизма, а также действующую в механизме силу трения. Например, используя подвижный блок, мы вынуждены будем совершать дополнительную работу по подъему самого блока с тросом и по преодолению силы трения в оси блока. Кроме того, выигрывая в силе, мы всегда проигрываем в пути, что также влияет на работу. Применительно к зубчатым передачам затраченная работа всегда больше полезной:

$$A_z > A_n \quad (15)$$

Полезная работа всегда составляет лишь некоторую часть полной работы, используя механизм. Физическая величина, показывающая, какую долю составляет полезная работа от всей затраченной работы, называется коэффициентом полезного действия механизма (КПД). Чтобы найти КПД механизма, надо полезную работу разделить на ту, которая была затрачена при использовании данного механизма.

Коэффициент полезного действия выражают в процентах и обозначают η :

$$\eta = \frac{A_n}{A_z} 100\% \quad (16)$$

Поскольку числитель A_n в этой формуле всегда меньше знаменателя A_z , то КПД всегда оказывается меньше 1 (или 100%).

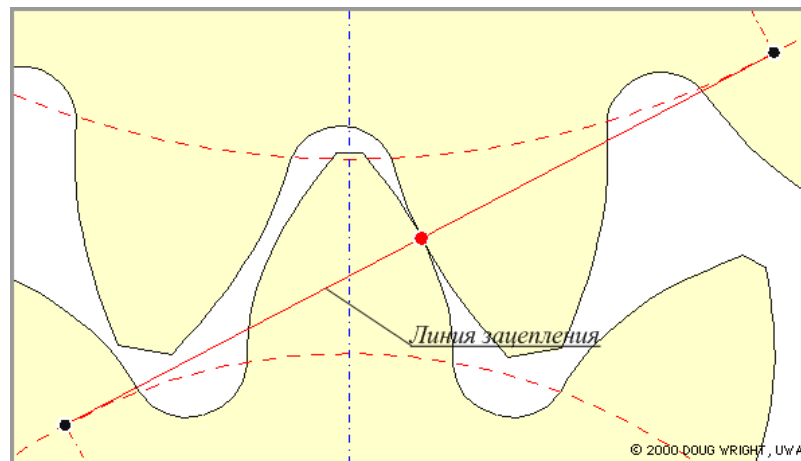
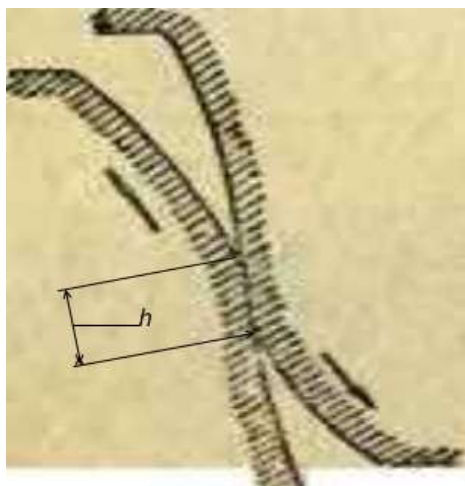


Рис. 7 – Контактное взаимодействие зубьев зубчатых колес по линии зацепления

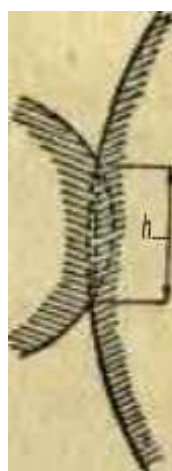
Потеря энергии на трение в зубчатых передачах доходит до 10% от всей потери энергии на преодоление трения. В зубчатой передаче потеря энергии происходит в зубьях вследствие их трения при несоответствии точности изготовления зубчатых передач по нормам кинематической точности, нормам плавности, нормам бокового зазора согласно требованиям ГОСТ1643-81 и особенностью трибологического контактирования эвольвентных сопрягаемых поверхностей.

У зубчатых колес изготовленных по степени точности 6-7-7ВГОСТ1643-82 и обильной смазке коэффициент полезного действия в среднем достигает $\eta = 0,95$, для зубчатых колес изготовленных по степени точности 8ВГОСТ1643-82 коэффициент полезного действия в среднем достигает $\eta = 0,92$.

Потеря энергии, происходящая вследствие трения сопрягаемых эвольвентных поверхностей зубьев цилиндрических зубчатых колес при внешнем зацеплении в основном происходит на соответствующих участках линии зацепления h (рис. 8).



а



б

Рисунок 8 – Изнашивание зубьев, происходящее вследствие продолжительного скольжения сопрягаемых эвольвентных поверхностей: а – участок h проскальзывания зубьев; б – участок изнашивания h сопрягаемых зубьев

При внутреннем зацеплении на соответствующих участках контакта h (рис. 9) при скольжении зубьев происходит интенсивный износ ведомого колеса.

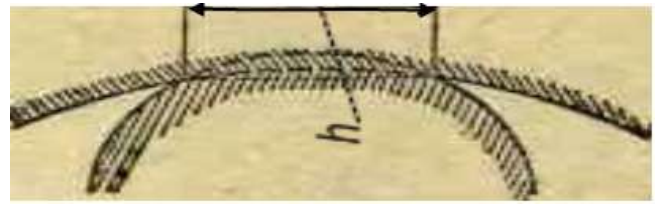


Рисунок 9 – Изнашивание зубьев, происходящее вследствие продолжительного скольжения сопрягаемых эвольвентных поверхностей с внутренним зацеплением

В полюсе зацепления происходит смена направлений скольжения. В приработанных зубчатых колесах наблюдается явно выраженная пограничная линия между профилями сопрягаемых зубьев колес.

Вследствие значительного удельного давления при скольжении интенсифицируется износ зубьев на участке h (рис. 8) делительного диаметра. Уменьшая угол исходного контура α_0 от 20° до 15° участок проскальзывания зубьев h уменьшается в 2,5 раза, но при этом уменьшается прочность зуба, т.к. утоняется ножка зуба (рис. 10)

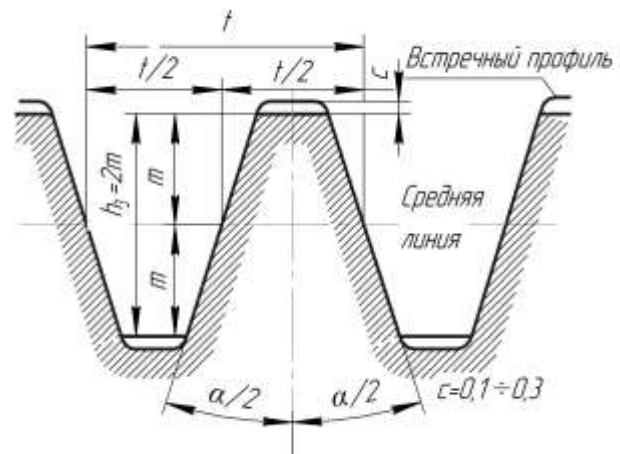


Рисунок 10 – Основные параметры исходного контура зубчатого зацепления с углом исходного профиля $\alpha/2$

Изменение профиля зависит кроме того от сопротивляемости материала зуба, от передаточного числа, продолжительности зацепления. При благоприятных условиях совместная работа нескольких пар зубьев может уменьшить износ наиболее подверженных этому участков профиля.

Износ, изменяя профиль зубьев, ведет к нарушению эвольвентного зацепления (рис. 8), которое для пары профилей и участок контактирования постоянно меняется одновременно с изменением отклонения профиля. Износ точек профиля, лежащих на начальной окружности, происходит в местах, где существует скорость скольжения, т. е. во всех точках зацепления

При отклонении профиля зубьев в следствии износа резко ухудшаются показатели плавности и кинематической точности зубчатой передачи.

При больших окружных скоростях необходимо учитывать помимо динамических нагрузок и усилия трения в зубчатых передачах.

В то же время при врезании вершины зуба шестерни во впадину сопрягаемого зуба колеса просходит интенсивное изнашивание профиля зуба колеса у ножки за счет шабрыщего эффекта вершины зуба шестерни, и таким образом возникает повышенный износ у ножки зуба колеса. Причиной быстрого износа зубьев является несоответствие точности зацепления и в меньшей степени нагрузка шестерни. Поэтому зубчатые быстроходные и тяжело нагруженные колеса должны изготавливаться с повышенной точностью. Для исключения эффекта шабрения вершины зубьев шестерни необходимо обязательно вершины зубьев изготавливать скругленными с радиусом ρ

$$\rho = 0,3 t, \quad (17)$$

где ρ – радиус округления вершины зубьев, мм, t – модуль, мм.

В зубчатых цилиндрических передачах трение качения значительно меньше трения скольжения, поэтому одной из преувеличивающих научных направлений является нахождение путей, направленных на уменьшение и сведение до минимума участка скольжения сопрягаемых эвольвентных профилей зубчатых колес и исследование процессов контактирования с учетом изменения параметров состояния поверхностного слоя зубьев (шероховатости, волнистости, твердости, физико-механических свойств материала зубчатых колес).

Выводы.

Контактирование цилиндрических зубчатых передач и технологических процессов формообразования цилиндрических зубчатых колес определяют условия трибологии зацепления зубьев.

В зубчатой передаче потеря энергии происходит в зубьях вследствие их трения при несоответствии точности изготовления зубчатых передач по нормам кинематической точности, нормам плавности, нормам бокового зазора согласно требованиям ГОСТ1643-81.

В полюсе зацепления происходит смена направлений скольжения. В приработанных зубчатых колесах наблюдается явно выраженная пограничная линия между профилями сопрягаемых зубьев колес.

Показано, что при силовых расчетах цилиндрических зубчатых колес необходимо учитывать помимо динамических нагрузок и усилия трения качения-скольжения в зубчатых передачах.

При вступлении в контакт вершины зуба шестерни с впадиной сопрягаемого зуба колеса просходит интенсивное изнашивание профиля зуба колеса у ножки за счет шабрыщего эффекта вершины зуба шестерни, и таким образом возникает повышенный износ у ножки зуба колеса.

Для исключения эффекта шабрения вершины зубьев шестерни необходимо обязательно вершины зубьев изготавливать скругленными с радиусом.

Список литературы: 1. Базров, Б. М. Основы технологии машиностроения / Б. М. Базров. – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с. 2. Демкин, Н. Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н. Б. Демкин, Э. В. Рыжов. – М., 1981. – 244 с. 3. Инженерия поверхностей деталей / Колл. Авт.; под ред. А. Г. Суслова. М.: Машиностроение. 2008. – 320 с. 4. Кане М. М. Управление качеством продукции машиностроения / М. М. Кане, А. Г. Суслов, О. А. Горленко и др. под общ. ред. д. т. н. М. М. Кане. – М.: Машиностроение, 2010. – 416 с. 5. Рыжов, Э. В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин / Э. В. Рыжов. – К.: Техніка, 1984. – 272 с. 6. Рыжов, Э. В. Контактирование твердых тел при статических и динамических нагрузках / Э. В. Рыжов, Ю. В. Колесников, А. Г. Суслов. – К.: Техніка, 1982. – 172 с. 7. Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач / Под общ. ред. В. Е. Старжинского, М. М. Кане. – С-Пб.: Профессия. 2007. – 832 с. 8. Тимофеев Ю. В. Научные предпосылки определения условий формирования величин упрочненного слоя при формообразовании крупномодульных зубчатых колес / Ю. В. Тимофеев, А. Н. Шелковой, А. А. Клочко // Вісник Національного технічного університету КПІ: зб. наук. пр. Тематичний випуск: Проблеми механічного приводу. – Київ: НТУ КПІ, 2012. – № 64. – С. 288–293.

Bibliography (transliterated): 1. Bazrov, B. M. *Osnovyi tehnologii mashinostroeniya* / B. M. Bazrov. – Moscow: Mashinostroenie, 2005. – 736 P. Print 2. Demkin, N. B. *Kachestvo poverhnosti i kontakti detaley mashin* / N. B. Demkin, E. V. Ryizhov. – Moscow, 1981. – 244 P. Print 3. *Inzheneriya poverhnostey detaley* / Koll. Avt.; pod red. A. G. Suslova. Moscow: Mashinostroenie. 2008. – 320 P. Print 4. Kane M. M. *Upravlenie kachestvom produktii mashinostroeniya* / M. M. Kane, A. G. Suslov, O. A. Gorlenko i dr. pod obsch. red. d. t. n. M. M. Kane. – Moscow: Mashinostroenie, 2010. – 416 P. Print 5. Ryizhov, E. V. *Tehnologicheskie metody povysheniya iznosostoykosti detaley mashin* / E. V. Ryizhov. – Kiev: Tehnlka, 1984. – 272 P. Print 6. Ryizhov, E. V. *Kontaktirovanie tverdyih tel pri staticheskikh i dinamicheskikh nagruzkah* / E. V. Ryizhov, Yu. V. Kolesnikov, A. G. Suslov. – Kie: Tehnlka, 1982. – 172 P. Print. 7. *Tehnologiya proizvodstva i metody obespecheniya kachestva zubchatyih koles i peredach* / Pod obsch. red. V. E. Starzhinskogo, M. M. Kane. – Sankt Peterburg.: Professiya. 2007. – 832 P. Print 8. Timofeev Yu. V. *Nauchnyie predposylki opredeleniya usloviy formirovaniya velichin uprochnennogo sloya pri formoobrazovanii krupnomodulnyih zubchatyih koles* / Yu. V. Timofeev, A. N. Shelkovoy, A. A. Klochko // *Visnik Natsionalnogo tehnichnogo univrsitetu KPI: zb. nauk. pr. Tematichnyy vipusk: Problemi mehanichnogo privodu.* – Kiev: NTU KPI, 2012. – No 64. – P. 288–293.

Поступила (received) 14.11.2015

Клочко Александр Александрович – док. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»; тел.: (057)-720-66-25;

Klochko Aleksandr Aleksandrovych – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25;

Гасанов Магамедэмин Исамагомедович – проректор по научно-педагогической работе, канд. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ», тел.: (057)-720-66-25;

Hasanov Mahamedymyn Ysamahomedovych – Vice-rector for scientific and pedagogical work, Candidate of Technical Sciences, Professor of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25;

Басова Евгения Владимировна – канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ», тел.: (057)-720-66-25, e-mail: evgeniya.ivaschenko@mail.ru;

Basova Evhenyia Vladymyrovna – Candidate of Technical Sciences, Docent of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25; e-mail: evgeniya.ivaschenko@mail.ru.

УДК 658.512

О.М. ШЕЛКОВИЙ, М.С. МАРТИНОВ, О.В. НАБОКА**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ І НАДІЙНОСТІ СКЛАДАННЯ ВУЗЛА «ГІДРОАГРЕГАТ» В УМОВАХ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИРОБНИЦТВА**

Наведено аналіз проблем та існуючих методів підвищення продуктивності складання вузлів. Для підвищення продуктивності та автоматизації складання вузлів запропонована математична модель системи імітаційного моделювання виробничих систем складання вузлів. Прогнозується підвищення продуктивності складання вузлів до 20% при використанні математичної моделі систем імітаційного моделювання виробничих систем.

Ключевые слова: складання вузлів, підвищення продуктивності, математична модель, систем імітаційного моделювання виробничих систем.

Введення. Процес складання є заключним етапом виготовлення машини, який значною мірою визначає її основні експлуатаційні якості. Умови досягнення високих експлуатаційних якостей машини не обмежуються створенням її вдалої конструкції або застосуванням високоякісних матеріалів для виготовлення її деталей. Не гарантує цих якостей і високоточне виготовлення деталей із забезпеченням оптимального стану поверхневих шарів їх сполучених або робочих поверхонь. Це пов'язано з тим, що в процесі складання цілком доброякісних виробів з різних причин можуть виникати похибки взаємного розташування деталей, істотно знижують точність і службові якості виробу, що збирається [1].

Актуальність цієї теми пов'язана з тим, що виконання складальних робіт пов'язано з великою витратою часу, яка складає значну частку загальної трудомісткості виготовлення машини. У машинобудуванні трудомісткість складальних робіт становить 20-70% загальної трудомісткості виготовлення виробу, а рівень їх автоматизації не перевищує 10-15%, залежно від типу виробництва. Також слід зазначити, що основна частина (50-85%) слюсарно-складальних робіт являє собою ручні роботи, що вимагають великих витрат фізичної праці і високої кваліфікації робітників. А з використанням різних систем АСПВ можливе підвищення економічних показників роботи підприємства, що дуже актуально на даному етапі в нашому виробництві. Тобто задачею цієї роботи є оптимізація технологічного процесу, що забезпечить мінімальний час складання вузла «Гідроагрегат» на вальцешліфувальному верстаті моделі 3А417РМ на основі імітаційного моделювання [2].

Ця стаття орієнтована на складальні підприємства дрібносерійного виробництва, які працюють з вальцешліфувальними станками.

Метою є – математична модель системи імітаційного моделювання виробничих систем складання вузлів.

Для досягнення цієї мети поставлені та вирішені наступні задачі:

1. Виконано аналіз проблем імітаційного моделювання виробничих систем складання вузлів.
2. Була виконана постановка задачі імітаційного моделювання виробничих систем складання вузла «Гідроагрегат».

3. Розроблена математична модель системи імітаційного моделювання виробничих систем складання вузлів.

Для повноцінної роботи системи проектування складального процесу потрібна конструкторсько-технологічна модель виробу (КТМВ). Це завдання має рішення у вигляді представлення виробу графом, вузли якого утворюються сукупністю модулів поверхонь (МП), а ребра - модулів з'єднання (МС). Відповідною підзадачею є декомпозиція виробу на МП і МС, встановлення зв'язків між ними і безпосередньо побудова графа виробу (рис 1).

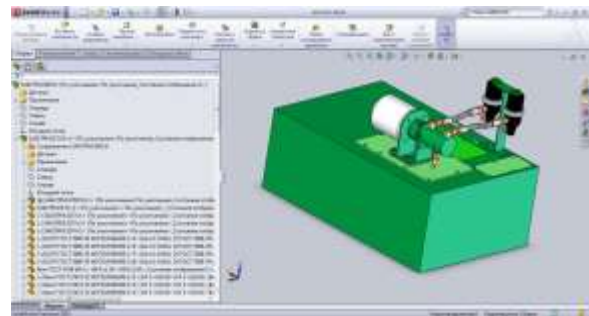


Рис. 1 – Тривимірна модель складального виробу 3А417РМ.300СБ «Гідроагрегат» і його дерево побудови

Таким чином, система проектування СДС СМВ матиме можливість пізнавати виріб і деталі як об'єкти, що взаємодіють, а не як абсолютно знеособлені тіла. На підставі вищевикладеного, пропонується наступний спосіб побудови САПР ТП складання (в порядку дотримання модулів, рис. 2).

Модуль отримання графа виробу (рис. 2). У даному модулі здійснюється автоматизована генерація графа виробу, що утворено сукупністю МПБ (МП що базують) деталей і зв'язками між ними. Виконується декомпозиція виробу на МП і виявлення МС. Вимагає алгоритму виділення і розпізнавання в деталях МП і МС. Після чого виявляють базові деталі для загальної і вузлових збірок. Для цього використовуються дані по масі, габаритам і кількості МС, які утворює деталь (рис. 3).

Математичне забезпечення імітаційної моделі виробничої системи складання вузла «Гідроагрегат» почи-

нається з розрахунку коефіцієнту складання для деталей вузла «Гідроагрегат».

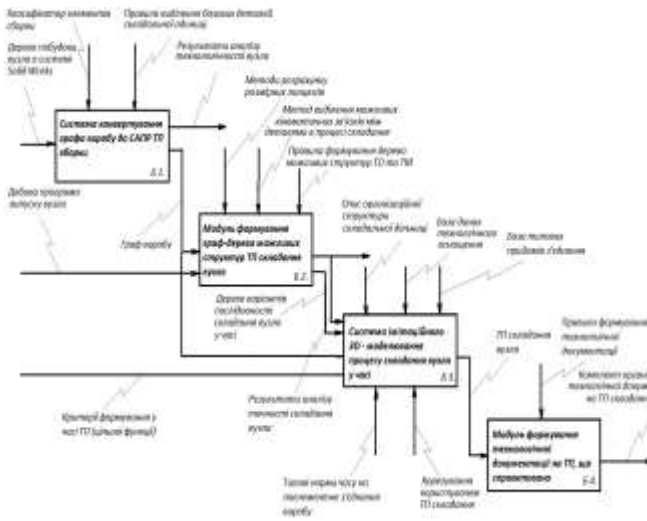


Рис. 2 – Методика оптимізації організаційно-технологічної структури СДС ССМВ

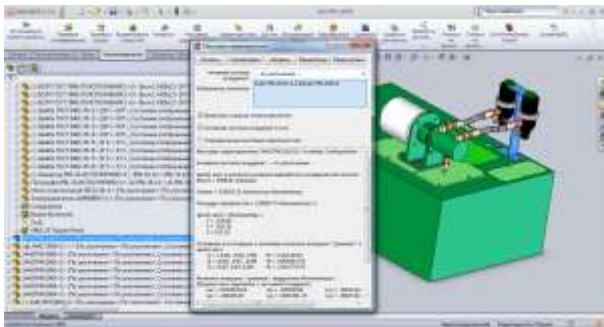


Рис. 3 – Приклад розрахунку у САПР «SolidWorks 2014» масових і габаритних характеристик деталей та їхніх поверхонь

Який в свою чергу починається з роботи в програмі Microsoft Excel. Спочатку потрібно визначитись, яка кількість деталей входить в зборку. Потім які з них являються базовими, а які кріпильними. Далі в таблицю, яка представлена на рис. 4 зводяться всі номери деталей, які між собою сполучаються в зборці, а також їхні площі дотику та об’єми.

На рис. 4 в колонці:

А – номер по порядку деталі;

В – назва деталі;

С – шифр деталі;

D – номер базової деталі

Е – номер деталі, яка встановлюється на базову деталь

Г – значення об’єму деталі, якщо номери в рядку по нульовій та першій колонки збігаються, якщо номери в рядку по першій і нульовій колонки не збігаються – площа поверхні по якій можливий контакт базової поверхні з приєднувальною;

G – вид деталі: 0 – базова, 1 – кріпильна.

Розраховується узагальнений коефіцієнт складання для кожної з деталей (Ksb_i), що входять у виріб (1)

A	B	C	D	E	F	G
0	Гарбузи	3441794.3000	0	0	3478766.33	0
1	Вент	3441794.3000	0	1	957794.53	0
2	Вент	3441794.3001	0	2	957794.54	0
3	Вент	3441794.3002	0	3	957794.55	0
4	Вент	3441794.3003	0	4	957794.53	0
5	Вент	3441794.3004	0	5	957794.54	0
6	Вент	3441794.3005	0	6	957794.53	0
7	Вент	3441794.3006	0	7	957794.54	0
8	Вент	3441794.3007	0	8	957794.53	0
9	Вент	3441794.3008	0	9	957794.54	0
10	Вент	3441794.3009	0	10	957794.53	0
11	Вент	3441794.3010	0	11	957794.54	0
12	Вент	3441794.3011	0	12	957794.53	0
13	Вент	3441794.3012	0	13	957794.54	0
14	Вент	3441794.3013	0	14	957794.53	0
15	Вент	3441794.3014	0	15	957794.54	0
16	Вент	3441794.3015	0	16	957794.53	0
17	Вент	3441794.3016	0	17	957794.54	0
18	Вент	3441794.3017	0	18	957794.53	0
19	Вент	3441794.3018	0	19	957794.54	0
20	Вент	3441794.3019	0	20	957794.53	0
21	Вент	3441794.3020	0	21	957794.54	0
22	Вент	3441794.3021	0	22	957794.53	0
23	Вент	3441794.3022	0	23	957794.54	0
24	Вент	3441794.3023	0	24	957794.53	0

Рис. 4 – Таблиця в програмі Excel для розрахунку коефіцієнту складання для деталей вузла «Гідроагрегат»

$$Ksb_i = 3 \sqrt{\frac{V_i}{V_{max}}} + \sqrt{\frac{S_{\Sigma i}}{S_{\Sigma max}}} + \frac{n_i}{n_{max}}, \quad (1)$$

де: V_{max} – об’єм самої великої деталі, V_i – об’єм поточної деталі, n_{max} – максимальна кількість деталей, що приєднується до одної з деталей у вузлі, n_i – кількість деталей, що приєднується до поточної деталі, $S_{\Sigma max}$ – максимальна сумарна площа поверхонь деталей, що контактують з однією з деталей, $S_{\Sigma i}$ – максимальна сумарна площа поверхонь деталей, що контактують з i -ю деталлю.

Розраховується коефіцієнт складання за допомогою програми Mathcad, тіло програми показано на рис. 5 – 6.

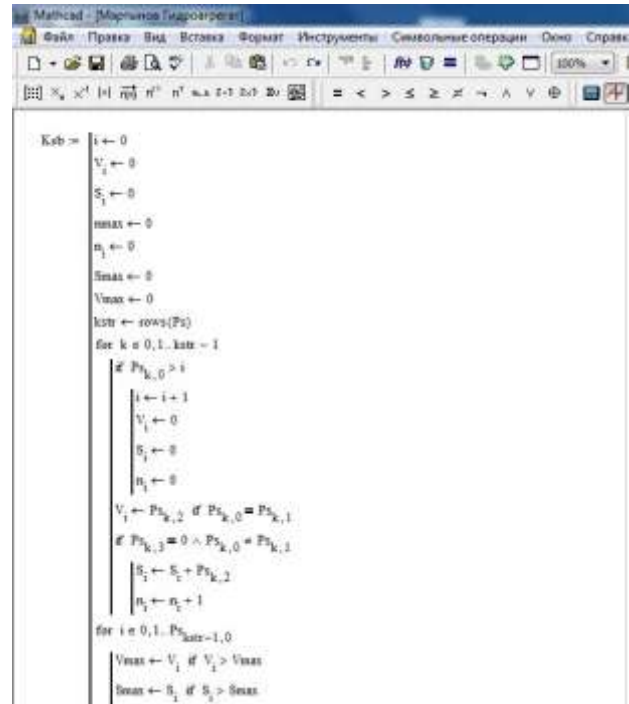


Рис. 5 – Початок програми в системі Mathcad для розрахунку коефіцієнту складання для деталей вузла «Гідроагрегат»

```

mmax ← n1 if n1 > mmax
for m = 0, 1..Pd_m-1, 0
    Kc_m,0 ← √(V_m / Vmax)
    Kc_m,1 ← √(S_m / Smax)
    Kc_m,2 ← n_m / mmax
    Kc_m,3 ← Kc_m,0 + Kc_m,1 + Kc_m,2
Kcb ← Kc
    
```

Рис. 6 – Закінчення програми в системі Mathcad для розрахунку коефіцієнту складання для деталей вузла «Гідроагрегат»

Далі проводиться розробка послідовності складання вузла «Гідроагрегат» за переходами в системі Mathcad завдяки програмі представленої на рис. 7 – 9.

```

For i ← 0
    Pd_1,2 ← 0
    Kd ← rows(Kcb)
    Ka ← rows(Pa)
    for k = 0, 1..Kd - 1
        for j = 0, 1..Ka - 1
            if Pd_j,0 = k ∧ Pd_j,1 = 0 ∧ Pd_j,2 = Pd_j,3 ∧ KcbPd_j,3 > Pd_j,2
                Pd_j,0 ← k
                Pd_j,1 ← -1
                Pd_j,2 ← KcbPd_j,3
                break if Pd_j,0 > k
            KcbPd_j,3 ← 0
        i ← i + 1
        Pd_1,2 ← 0
        Pd_1,3 ← -1
        Pd_1,0 ← -1
    while i < Kd
        for j = 0, 1..i - 1
            for r = 0, 1..Ka - 1
                if Pd_r,0 = 0 ∧ Pd_r,1 = Pd_r,2 ∧ Pd_r,3 < KcbPd_j,3 ∧ Pd_r,0 = Pd_j,0
                    Pd_r,1 ← Pd_j,1
                    Pd_r,2 ← Pd_j,2
    
```

Рис. 7 – Початок програми в системі Mathcad для розробки послідовності складання вузла «Гідроагрегат» за переходами

```

Pd_1,3 ← KcbPd_j,3
break if Pd_r,2 = 0
KcbPd_r,3 ← 0
i ← i + 1
Pd_1,2 ← 0
Pd_1,1 ← -1
Pd_1,0 ← -1
n ← 0
for i = 0, 1..rows(Kcb) - 1
    if Kcb_i,1 = 0
        j ← i
        Pd_0 ← j
        Pd_1 ← -1
        Pd_2 ← Kcb_i,3
        for k = 0, 1..rows(Pa) - 1
            if Pd_k,0 = j ∧ Pd_k,1 = Pd_k,2
                n ← Pd_k,1
                for r = 0, 1..rows(Pa) - 1
                    Pd_r,1 ← r if Pd_r,0 = n ∧ Pd_r,2 < r
                for m = rows(Pa) - 1, rows(Pa) - 2, Pd_1 + 1
    
```

Рис. 8 – Продовження програми в системі Mathcad для розробки послідовності складання вузла «Гідроагрегат» за переходами

```

Pd_m+1,0 ← Pd_m,0
Pd_m+1,1 ← Pd_m,1
Pd_m+1,2 ← Pd_m,2
Pd_m+1,3 ← Pd_m,3
Pd_m+1,1 ← Pd_m,1
Pd_m+1,2 ← Pd_m,2
Pd_m+1,3 ← Pd_m,3
Pd_0,3 ← 0
for k = 1, 2..rows(P) - 1
    for r = k, k - 1..0
        if Pd_k,1 = Pd_r,0
            Pd_k,3 ← Pd_r,3 + 1
            break
P
    
```

Рис. 9 – Закінчення програми в системі Mathcad для розробки послідовності складання вузла «Гідроагрегат» за переходами

Розробка структур технологічних операцій, що забезпечують мінімальний час складання вузла «Гідроагрегат» розпочинається з системи Mathcad завдяки програмі представленої на рис. 10.

Цикл «for» дозволяє визначити, які блоки (вузли, під вузли) формуються в загальному складальному вузлі. Для того щоб у подальшому сформувані варіанти послідовності складання виробу в цілому.

```

For i ← 0
    for i = 0, 1..rows(Kcb) - 1
        if Kcb_i,1 = 0
            j ← i
            Pd_m,0 ← j
            Pd_m,1 ← -1
            for k = 0, 1..rows(Pa) - 1
                if Pd_k,0 = j ∧ Pd_k,1 = Pd_k,2
                    n ← Pd_k,1
                    for r = 0, 1..rows(Pa) - 1
                        Pd_r,1 ← r if Pd_r,0 = n ∧ Pd_r,2 < r
                    Pd_m,1 ← Pd_r,1 + 1
            Pd_m,1 ← Pd_m,1 + 1
    
```

Рис. 10 – Програма в системі Mathcad для розробки структур технологічних операцій, що забезпечують мінімальний час складання вузла «Гідроагрегат»

Розрахуємо коефіцієнт складання за допомогою програми Mathcad. Для з колонок D, E, F та G (рис. 4) утворюємо масив в програмі Mathcad рис. 11.

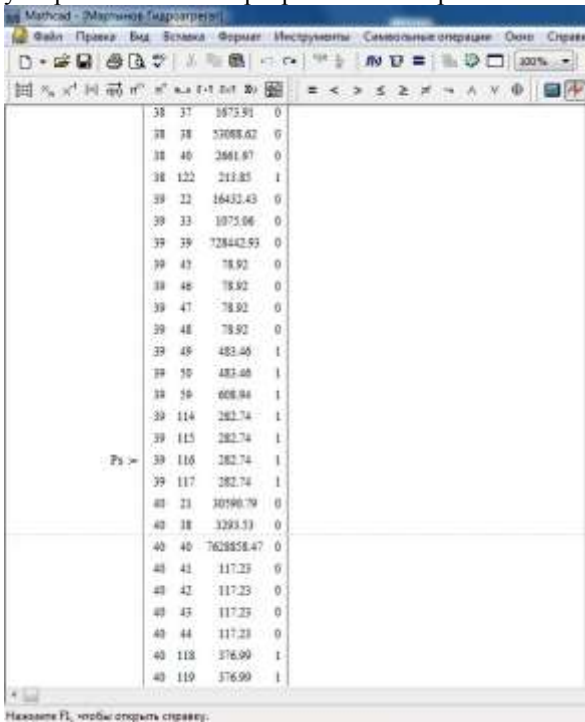


Рис. 11 – Масив в програмі Mathcad для розрахунку коефіцієнту складання для деталей вузла «Гідроагрегат»

Після перевірки масиву за допомогою програми розрахунку коефіцієнту складання для деталей вузла «Гідроагрегат» в системі Mathcad представлена на рис. 5 - 6 розраховуємо коефіцієнт складання та зводимо всі данні в одну матрицю в системі Mathcad представлена на рис. 12.

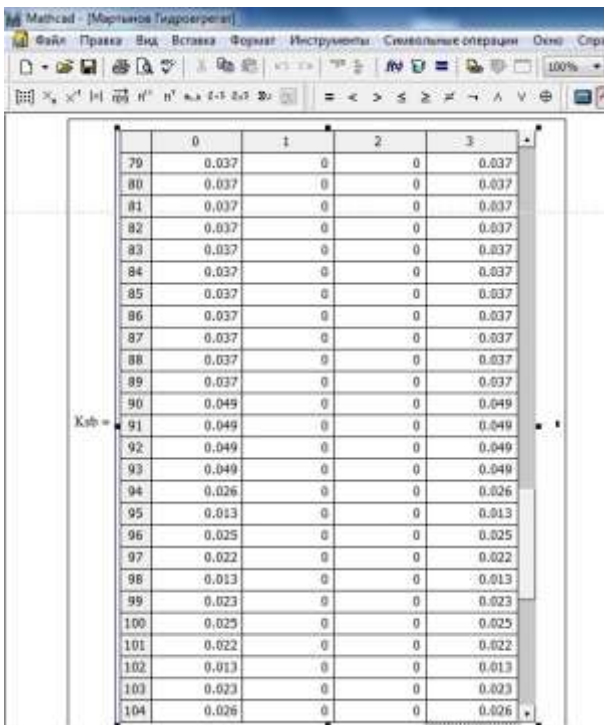


Рис. 12 – Матриця в системі Mathcad з розрахованими коефіцієнтами складання для деталей вузла «Гідроагрегат»

Далі проводиться розробка послідовності складання вузла «Гідроагрегат» за переходами в системі Mathcad завдяки програмі представленій на рис. 7 – 9 та зводимо всі данні в одну матрицю в системі Mathcad представлена на рис. 13.

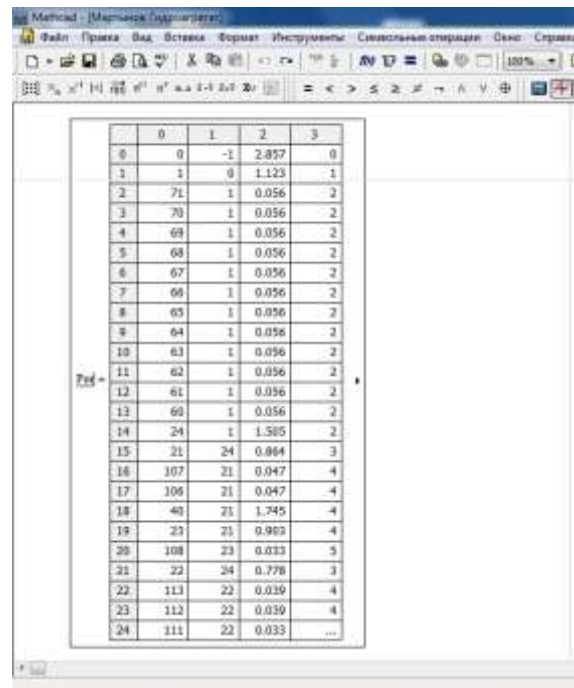


Рис. 13 – Матриця в системі Mathcad з даними для розробки послідовності складання вузла «Гідроагрегат» за переходами

Згідно значень матриці представленій на рис. 13 формується послідовність складання вузла «Гідроагрегат» за переходами.

Матриця даних для алгоритму зображеному на рис. 10 представлена на рис. 14.

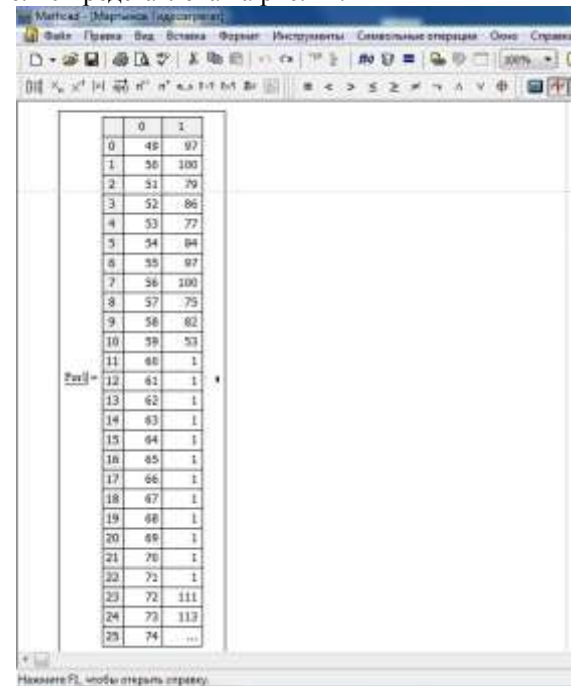


Рис. 14 – Матриця даних в системі Mathcad для розробки структур технологічних операцій, що забезпечують мінімальний час складання вузла «Гідроагрегат»

Де колонка 0 – номер кріпильної деталі, яка встановлюється у вузол;

колонка 1 – номер рядка в масиві $P_{ог}$, відповідний останній базовій деталі, що сполучається з поточною кріпильною.

За рахунок всіх цих даних визначаємо структуру та послідовність виконання складальних операцій (рис. 15).

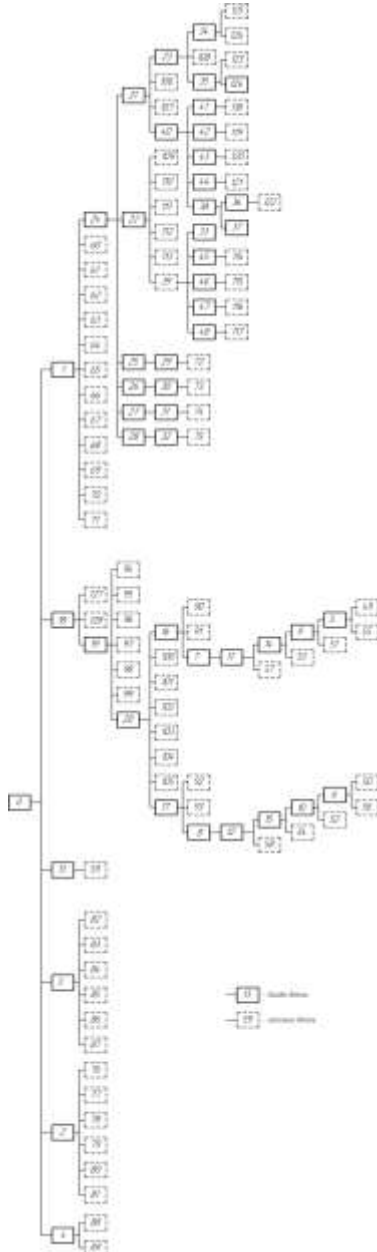


Рис. 15 – Структура та послідовність виконання складальних операцій

Висновки

1. Розробка технологічного процесу складання вузла «Гідроагрегат» починається та повністю залежить від коефіцієнту збираємості.

2. Система Mathcad дуже полегшує розрахунок коефіцієнту збираємості та розробку послідовності складання вузла «Гідроагрегат», що дозволяє економити час на впровадження технологічного процесу у виробництво.

Список літератури: 1. Технология машиностроения: Учебник для машиностроительных специальностей вузов/ А.А. Гусев, Е.Р. Ковальчук, И.М. Колесов и др. – М.: Машиностроение, 1986. – 480 с. 2. Балабанов А. Н. Краткий справочник технолога-машиностроителя. – М.: Издательство стандартов, 1992. – 464 с. 3. Егоров М.Е. Основы проектирования машиностроительных заводов. Изд. 6-е, переработ и доп. Учебник для машиностроит. вузов. М.: «Высш. школа», 1969. – 480 с. 4. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2 / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с. 5. Новиков В.Ю., Схиртладзе А.Г. Технология станкостроения: Учеб. пособие для техникумов по специальности «Производство станков с программным управлением и роботов». – М.: Машиностроение, 1990. – 256 с. 6. Скоркін А.О. Підвищення ефективності зборки в умовах дрібносерійного машинобудівного виробництва на основі імітаційного моделювання структури процесу/Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук по спеціальності 05.02.08 – технологія машинобудування. Харків: «Українська інженерно-педагогічна академія», - 2014. – 338с. 7. ОНТП 14-93 Механообрабатывающие сборочные цехи. – Введ. 01.01.1993. – 270 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Technology mashinostroeniya: Textbook for Universities mashynostroytelnykh specialties* / A.A. Gusev, E.R. Kovalchuk, I.M. Kolesov et al. - Moscow: Engineering, 1986. - 480 P. 2. Balabanov A. *Brief Directory technologist-mashynostroytelya*. - Moscow: Publishing standartov, 1992. - 464 P. 3. Egorov M.E. *Fundamentals of Designing mashynostroytelnykh plants*. Ed. Sixth, pererabot and add. Textbook for mashynostroyt. universities. Moscow: "High society. School ", 1969. - 480 P. 4. *Directory technologist-mashynostroytelya*. In 2 tonnes. Vol.2 / Ed. A.G. Kosylovoy and R.K. Meshcheryakov. - 4th ed., Rev. and add. - Moscow: Mashynostoenye, 1985. - 496 P. 5. Novikov V.U., Skhirtladze A.G. *Technology stankostroeniya: Textbook. posobyе for tehnykumov on specialty "Stankov with production of software management and robots."* - Moscow: Engineering, 1990. - 256 P. 6. A. Skorkin *Improved assembly conditions in small-series production based on machine simulation modeling process structure / thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.02.08 - Technology of mechanical engineering*. Kharkiv: "Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy" - 2014. - 338P. 7. ONTP 14-93 *Mehanoobrabatyvayuschyе sborochnyе shops*. - Key. 01.01.1993. - 270 p.

Поступила (received) 17.11.2015

- Шелковий Олександр Миколайович** – док. техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»; тел.: (057)-720-66-25;
Shelkovyi Oleksandr Mykolaiovych – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25;
Мартинов Михайло Сергійович – аспірант НТУ «ХПІ» тел.: (057)-720-66-25;
Martynov Mykhailo Serhiiovych – graduate student, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25;
Набока Олена Володимирівна – канд. техн. наук, проф. НТУ «ХПІ»; тел.: (057)-720-66-25;
Naboka Olena Volodymyrivna – Candidate of Technical Sciences, Professor of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25.

УДК 621.923

М.С. СТЕПАНОВ, А.А. КЛОЧКО, О.А. АНЦЫФЕРОВА

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПОВЕРХНОСТНЫЙ СЛОЙ ПРИ ЗУБОШЛИФОВАНИИ

Одним из основополагающим фактором обеспечения высокой долговечности закаленных зубчатых колес является изучение состояния напряжений в поверхностном слое, определяющимся видом и условиями технологического воздействия в процессе зубошлифования. Рассмотрено влияние остаточных напряжений на прочность зубчатых колес в зависимости от тепла, возникающего в зоне резания и приводящие к образованию растягивающих напряжений, изменению твердости и структуры. Причиной структурных напряжений являются изменения объема по сечению материала, вызванные превращением аустенита меньшего удельного объема в структуре большего удельного объема.

Ключевые слова: зубошлифование, поверхностный слой, технологическое воздействие, закаленное зубчатое колесо.

Введение. Состояние напряжений в поверхностном слое определяется видом и условиями технологического воздействия на эвольвентную поверхность зубчатого колеса в процессе зубошлифования.

Изменение состояния поверхностного слоя происходят в результате внесения в него энергии, необходимой для удаления материала в процессе зубошлифования.

Увеличение глубины резания сопровождается ростом сил резания, что способствует уменьшению величины растягивающих напряжений в поверхностном слое шлифованной поверхности зубьев зубчатого колеса.

Основная часть. Остаточные напряжения влияют на прочность зубчатых колес и зависят от тепла, возникающего в зоне резания, что приводит к образованию растягивающих напряжений, изменению твердости и структуры. В связи с этим возникает необходимость разработки математического моделирования описания степени влияния сил резания на процесс образования остаточных напряжений. Причиной структурных напряжений являются изменения объема по сечению материала, вызванные превращением аустенита меньшего удельного объема в структуре большего удельного объема (мартенсит, бейнит, перлит, феррит) [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Структурные остаточные напряжения в поверхностном слое зубчатых колес при различных схемах зубошлифования (рис. 1) появляются всегда совместно с тепловыми напряжениями и вызывают возникновение растягивающих напряжений, а в сердцевине - напряжений сжатия.

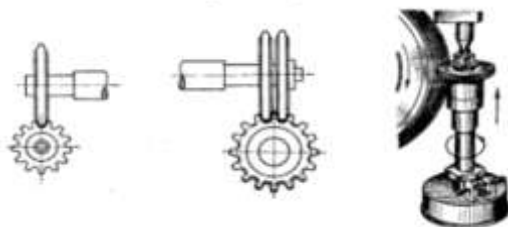
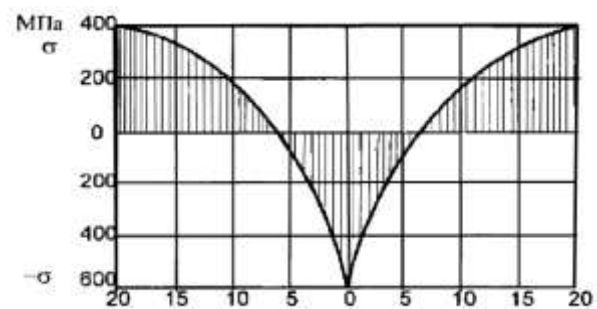


Рис. 1 – Схемы зубошлифования цилиндрических зубчатых колес: а – одним абразивным кругом; б – двумя абразивными кругами; в – абразивным винтовым кругом

В некоторых случаях [2, 5] превращение аустенита происходит раньше, что ведет к возникновению в сердцевине напряжений сжатия, а в верхнем слое растя-

гивающих [3, 4]. Такое распределение начальных напряжений, вызванных фазовыми превращениями, показано на рис. 2 [2, 5].



Глубина происходящих изменений, мм

Рис. 2 – Распределение структурных напряжений, вызванных фазовыми превращениями

При зубошлифровании имеет место переход напряжений от внешней поверхности в сторону сердцевины, которые превращаются из растягивающих напряжений в напряжения сжатия. Причины этого явления находятся в изменениях, происходящих в поверхностном слое эвольвентной поверхности зубчатого колеса при зубошлифровании. Измерение величины остаточных напряжений и оценка их развития дает возможность оценивать воздействия, как тепла, так и связанных с ним структурных изменений. Поэтому исследование развития и характера начальных напряжений, как по глубине поверхностного слоя, так и на самой поверхности обрабатываемого материала имеет важное значение.

Анализируя распределение микротвердости в поверхностном слое, можно сделать вывод, что на структурные изменения верхнего слоя решающим образом влияет распределение тепла, так как в верхней части верхнего слоя могут появляться температуры, которые являются достаточными для создания мартенситных структур [2, 3, 6]. Влияние температуры и воздействие трения уменьшается с достижением более глубоких зон поверхностного слоя.

Распределение остаточных напряжений и распределение твердости [2, 5] позволяют предполагать, что напряжения, возникающие в результате зубошли-

фовання при воздействии шлифовального круга являются довольно существенными.

Возникающие напряжения сжатия своим постепенным убыванием противодействуют растягивающим напряжениям, а уменьшение твердости сопровождается непосредственно растущими растягивающими напряжениями [4, 6].

Структурные изменения приводят также к росту погрешности отклонения эвольвентного профиля зуба и отклонению шага зацепления [1, 7].

Для поверхностного слоя начальные остаточные напряжения являются основным фактором при его формировании.

Все напряжения можно разделить на:

- напряжения, появляющиеся в зубчатых колесах, во время воздействия на них внешних сил,
- напряжения, остающиеся в телах, после того как внешние силы перестают действовать на них.

Именно в случае напряжений в телах, на которые не воздействуют внешние силы, применяется определение остаточные напряжения [2, 6].

Существует также и другая классификация напряжений, а именно: напряжения первого рода, напряжения второго рода, напряжения третьего рода. С учетом ограничения области напряжений можно разделить на макронапряжения и микронапряжения [2, 4, 5].

Используя термин искажение кристаллической решетки [2, 3, 6] следует принимать во внимание, что область распространения остаточных напряжений сравнима с размером элементарной кристаллической ячейки.

При формообразовании поверхностного слоя зубчатых колес, независимо от примененного метода обработки резанием лезвийной или абразивной, всегда образуются остаточные напряжения [1, 2, 3, 7]. В процессе эксплуатации, когда поверхности зубчатых колес подвергаются различного вида нагрузкам, появляются дополнительные напряжения с переменной динамической амплитудой [3, 5]. Если динамическое напряжение является нулевым, а статическое напряжение не превышает сопротивления разрыву, то прочность такого элемента является неограниченной [3, 6]. Причиной ограниченной прочности является появление динамических напряжений величиной превышающей предел усталости (выносливости) (рис. 3) [3, 4, 5].

В общем случае напряжения вызывают в материале сложное сочетание явлений, сопровождающихся различными изменениями, которые зависят от величины этих напряжений и числа циклов [2, 4], что является, как правило, фактором, определяющим вид разрушения материала [1, 3, 6].

Применительно к зубьям зубчатых колес усталостная трещина зарождается на поверхности, подвергнутой деформации (в присутствии растягивающих остаточных напряжений) [4, 6]. При этом существенную роль играет состояние напряжений, то есть, величина, направление и изменения остаточных напряжений в поверхностном слое [2, 6].

Уменьшение сил резания и глубины резания приводит к росту влияния сил трения [3, 5, 6].

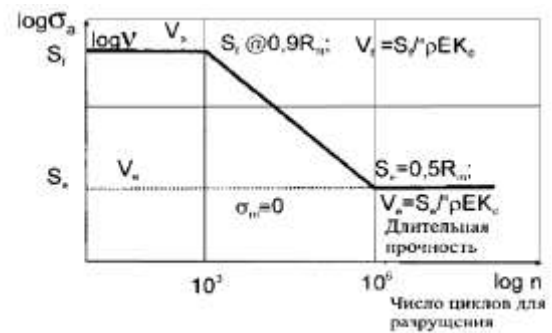


Рис. 3 – Общая диаграмма напряжений для конструкционных сталей

Количество тепла в зоне резания увеличивается, что ведет к возникновению термических напряжений, которые определяются как [140, 218]:

где: E - модуль Юнга; p - коэффициент Пуассона; I - коэффициент теплопроводности; t_{cp} - средняя температура; t - текущая температура поверхности.

Воздействие тепла во время зубошлифования может привести к возникновению новой закаленной зоны и находящегося под ней «мягкого» слоя [4, 6]. Этот процесс может сопровождаться преобразованием напряжений в поверхностном слое. В общем случае остаточные напряжения

$$\sigma = \frac{E}{1 - \mu} \lambda (t_{\psi} - t)$$

оказывают влияние на механические, физические и химические свойства обрабатываемого материала зубчатых колес (рис. 4).



Рис. 4 – Влияние остаточных напряжений на свойства поверхностного слоя обрабатываемого предмета

Если в процессе технологического воздействия не происходят разовые и структурные изменения в материале, то преобладающее термическое влияние вызовет появление растягивающих напряжений, а механическое воздействие в случае растягивающих деформаций вызовет появление остаточных напряжений сжатия. Во время шлифования изменяются условия резания в зоне соприкосновения шлифовального круга с обрабатываемым зубом зубчатого колеса.

При использовании нерациональных параметров шлифования на шлифуемой поверхности зубчатого колеса появляется белый слой вторичной закалки, отпущенный мартенсит и остаточный аустенит [4, 6]. Поэтому условия обработки имеют важное значение в процессе шлифования, а их несоответствующий под-

бор может привести к росту сил резания, увеличенному износу шлифовального круга, засаливаемости круга, росту температуры шлифования и увеличению остаточных напряжений в поверхностном слое обработанной поверхности, к появлению трещин и росту количества остаточного аустенита. Трещины возникают в результате отпуска мартенситной структуры, что прямо связано с образованием остаточных напряжений [2, 3, 5].

Огромную роль в процессе шлифования играет шлифовальный круг [3, 4, 5, 6]. Во время шлифования активное участие в резании принимает только часть рабочей поверхности шлифовального круга:

- 10 - 15% шлифовальных зерен, находящихся на рабочей части поверхности шлифовального круга участвуют в резании;
- 85 – 90% шлифовальных зерен рабочей поверхности шлифовального круга участвуют в пластических и упругих деформациях;
 - остальная часть абразивных зерен не принимает участия в резании;
- рост скорости резания вызывает рост температуры в зоне контакта;
- рост температуры способствует изменению адгезионных свойств в зоне контакта материала шлифовальных зерен и обрабатываемой поверхности зубчатого колеса.

Все отмеченное способствует зарождению остаточных напряжений, связанных в основном, с термическими влияниями. При этом большое значение имеет положение шлифовального круга по отношению к зубу в точке контакта. Процесс контактирования шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью рассматривался во многих работах [1, 4, 6, 6].

При построении теоретической модели необходимо учитывать одновременное влияние трения, температуры в зоне контакта и сил резания, что позволит установить зависимость глубины резания на засаливаемость шлифовального круга. Корундовый шлифовальный круг ведет к образованию в зоне резания в два раза большей температуры, чем при применении боразонового шлифовального круга.

Очень важным моментом при зубошлифовании является обеспечение уменьшения температуры в зоне контактирования абразивного круга и обрабатываемой эвольвентной поверхности зубчатого колеса, сил резания с одновременным увеличением объема снимаемого металла и уменьшением степени засаливаемости круга.

Силы резания и температура зависят от характеристики шлифовального круга и способа шлифования, тем более, что шлифование эвольвентных поверхностей зубьев зубчатых колес отличается некоторой спецификой протекания тепла [1, 4, 5, 6] с неравномерными силами шлифования [2, 4, 5, 6, 7]. Поэтому процесс зубошлифования трудно поддается моделированию по сравнению с другими способами шлифования [3, 4, 8].

Огромную роль в процессе зубошлифования играет также смазочно-охлаждающая жидкость [4, 5e,

7]. Расход СОЖ влияет на величину температуры [2, 4, 7]. С увеличением расхода СОЖ температура во время шлифования понижается [2, 7]. При этом деформации поверхностного слоя обрабатываемого материала, на которые оказывается тепловое воздействие [3], могут быть разными и зависят они от скорости распространения энергии [4, 5].

Следует подчеркнуть, что кинематика процесса шлифования зубьев зубчатых колес, а также особенно параметры процесса шлифования, имеют большое значение для возникновения остаточных напряжений [6]. Возникающие колебания во время шлифования зубчатых колес приводят к нарушению стабильности процесса шлифования [2, 3, 5, 6] и, тем самым, к переменной толщине срезаемого слоя.

В процессе шлифования могут иметь место три существенных фактора, влияющих на изменения остаточных напряжений в поверхностном слое [4]:

- термические;
- структурные;
- механически деформационные.

Микротрещины появляются также в результате, прежде всего, высокой временной температуры зубошлифования - свыше точки АСз а также структурных изменений [5, 7], происходящих в верхнем слое под влиянием разницы температур в микрообластях обрабатываемого материала [3, 4, 5]. Когда величина остаточных напряжений превысит предел прочности обрабатываемого материала, тогда происходит процесс микроразрушения поверхностного слоя [2, 4, 5, 6]. Это явление свидетельствует также о концентрации остаточных напряжений и высокой их интенсивности [3, 5, 6, 7].

Структурные напряжения вызываются изменением объема (мартенситно - аустенитных превращений [2]) при переходе через интервал критических температур (например, в аустенит, перлит, мартенсит, бейнит) [6, 7]. Поэтому усиление диффузии наблюдается только в некотором интервале средних температур [3, 5], а в высоких температурах преобладают эффекты, вызванные тепловыми колебаниями [3, 5, 98].

Рост растягивающих напряжений, вызванный теплым воздействием ведет к понижению усталостной прочности [4, 5, 6] (рис. 5).

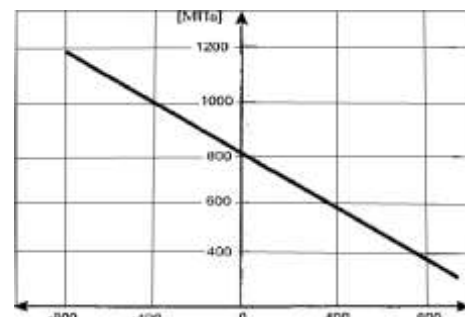


Рис. 5 – Зависимость усталостной прочности от максимальных напряжений в поверхностном слое после обработки

Во время шлифования обнаружено возникновение очень высоких растягивающих начальных напряжений в поверхностном слое зубчатых колес [3, 6, 7],

достигающих 1000 [МПа] (рис. 6).

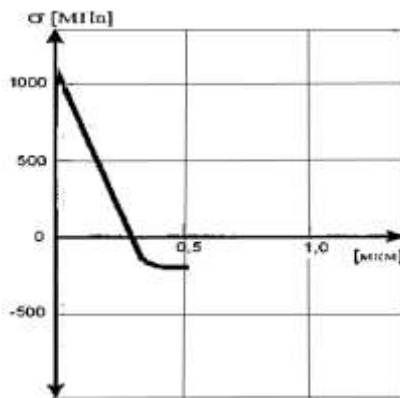


Рис. 6 – Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое зубчатых колес, зубошлифование методом обкатки двухсторонним конусным шлифовальным кругом [4, 6]

Тепло в поверхностном слое, на глубине свыше 10 мкм, ведет к значительному приращению остаточных растягивающих напряжений, и только на больших глубинах (рис. 6) – к напряжениям сжатия [3, 5, 6]. Таким образом, связь тепла с остаточными напряжениями является очевидной. Однако характер этой связи требует проведения дальнейших исследований, связанных с изменением свойств поверхностного слоя, особенно при шлифовании зубьев зубчатых колес.

Выводы. Воздействие тепла при зубошлифовании приводит к возникновению новой закаленной зоны и находящегося под ней «мягкого» слоя. Этот процесс сопровождается преобразованием напряжений в поверхностном слое. В общем случае остаточные напряжения оказывают влияние на механические, физические и химические свойства обрабатываемого материала зубчатых колес. Во время зубошлифования изменяются условия резания в зоне соприкосновения шлифовального круга с обрабатываемым зубом зубчатого колеса. При использовании нерациональных параметров зубошлифования на шлифуемой поверхности зубчатого колеса появляется белый слой вторичной закалки, отпущенный мартенсит и остаточный аустенит. Трещины возникают в результате отпуска мартенситной структуры, что прямо связано с образованием остаточных напряжений.

Список литературы: 1. Kane M.M. Управление качеством продукции машиностроения / М. М. Кане, А. Г. Суслов, О. А. Горленко и др. под общ. ред. д.т.н. М. М. Кане. – М.: Машиностроение, 2010. – 416 с. 2. Физико-математическая теория процессов обработки мате-

риалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 10. "Концепции развития технологии машиностроения" – Одесса: ОНПУ, 2005. – 565 с. 3. Влияние термомеханических напряжений на трещинообразование при шлифовании цементуемых сталей / Якимов А.В., Григорьян Г.Д., Усов А.В., Сазонов И.П. // Резание алмазно-абразивными инструментами: Тез. докл. Всес. науч.-техн. конф. «Алмазы -81», Харьков, октябрь, 1981/ ХПИ. – Харьков, 1981. – С.290-292. 4. Якимов А.В. Технологические основы обеспечения и стабилизации качества поверхностного слоя при шлифовании зубчатых колес / А.В. Якимов // – Астропринт. 2003. – 453 с. 5. Новоселов Ю.К. Моделирование операций при оценке отклонений формы деталей при шлифовании / Ю.К. Новоселов, Д.А. Кайнов // Сучасні технології в машинобудуванні: збірник наукових статей. – Том 2. – Харків: НТУ «ХПІ», 2006. – С. 391-400. 6. Новиков Ф.В. Теория высококачественной обработки деталей машин: монография / Ф.В. Новиков. – Х.: Вид. ХНЕУ, 2013. – 384 с. 7. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 2. "Термофизика резания материалов" – Одесса: ОНПУ, 2003. – 625 с. 8. Шелковой А.Н. Общие принципы моделирования оптимального управления параметрами точности, качества и производительности зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес / А.Н. Шелковой, Е.В. Мироненко, А.А. Ключко // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Серія «Машиноприладобудування та транспорт». – Севастополь, 2013. – Вип. 140. – С. 203–210.

Bibliography (transliterated): 1. Kane M. M. quality Management of engineering products / M. M. Kane, A. G. Suslov, O. A. Gorlenko, etc. under the General editorship of D. M. Kan. – Moscow : Mashinostroenie, 2010. – 416 P. 2. Physico-mathematical theory of processes of processing of materials technology and engineering / ed. by F. V. Novikov and A. V. Yakimov. In ten volumes. – Vol. 10. "The concept of development of engineering technologies", Odessa: ONPU, 2005. – 565 P. 3. The influence of thermomechanical stresses on cracking in grinding case hardening steels / Yakimov A. V., Grigoryan G. D., Usov V. A., Sazonov I. P. // Cut of diamond-abrasive tools: proc. Dokl. Vses. scientific.-tech. Conf. "Diamonds -81", Kharkov, October, 1981/ KPI. - Kharkov, 1981. - P. 290-292. 4. Yakimov A. V. the Technological basis for ensuring and stabilizing the quality of the surface layer when the grinding of gears / A. V. Yakimov // - Astroprint. 2003. - 453 P. 5. Novoselov Y. K. Modeling of operations in the evaluation of deviations of the shape of the parts when grinding / Y. K. Novoselov, D. A. Kainov // Modern technology in mashinobuduvannya: collected articles g. – Volume 2. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2006. – PP. 391-400. 6. Novkov F. V. Theory visalakshi treatment of details of machines: monograph / F. V. Novkov. – H.: Hnew, 2013. – 384 P. 7. Physico-mathematical theory of processes of processing of materials technology and engineering / ed. by F. V. Novikov and A. V. Yakimov. In ten volumes. – Vol. 2. "Thermophysics of cutting materials" – Odessa: ONPU, 2003. – 625 P. 8. Sheilkovoy A. N. General principles of modeling of optimal control parameters of precision, quality and productivity-pitch gears hardened gears / A. N. Sheilkovoy E. V. Mironenko, A. A. Klochko // Bulletin of SevNTU : CG. Sciences. etc. Series "Machinereadable the transport." –Sevastopol, 2013. – The No. 140. – PP. 203-210.

Поступила (received) 20.11.2015

Степанов Михаил Сергеевич – доктор технических наук, профессор, декан машиностроительного факультета, НТУ «ХПИ»;

Stepanov Mikhail Sergeevich – doctor of technical Sciences, Professor, Dean of the Mechanical Engineering Faculty, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25;

Ключко Александр Александрович – доктор технических наук, профессор НТУ «ХПИ»;

Klochko Alexander Alexandrovich – doctor of technical Sciences, Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25;

Анцыферова Олеся Александровна – инженер I категории НТУ «ХПИ»;

Antsyferova Olesya Aleksandrovna – engineer of I category, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute».

РЕФЕРАТИ

УДК 621.865.6

Отримання нано- та субмікроструктур при дії лазерного випромінювання на PI з твердих сплавів / Г.І. Костюк // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – № 40(1149). – С. 4-6. – Бібліогр.: 23 назв. – ISSN 2079-004X.

Експериментально визначено розмір зерна за допомогою растрової мікроскопії (PEM-106), а також проведено теоретичне дослідження об'єму і розміру зерна наноструктур при дії іонізуючого опромінювання на різальний інструмент (PI) з твердих сплавів T15K6, TN20, мінералокераміки, Ельбор-Р, порівняння результатів яких з експериментом за величиною розміру зерна дозволяє говорити про адекватність теоретичної моделі визначення розміру зерна.

Ключові слова: розмір зерна, растрова електронна мікроскопія, лазерне випромінювання, об'єм нанокластера.

УДК 621.91

Зношування та стійкість різальних інструментів із ПКНБ з зносостійким покриттям на основі нітриду бору у аморфному стані / С.Ан. Клименко, С.А. Клименко, В.М. Берсснев // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – № 40(1149). – С. 7-10. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-004X.

Одним із найбільш ефективних методів підвищення стійкості різальних інструментів із ПНТМ на основі КНБ, є нанесення на робочі поверхні інструменту функціональних наноструктурних зносостійких покриттів. Застосування таких покриттів дає можливість знизити температуру різання та покращити працездатність різального інструменту, завдяки цілеспрямованій зміні фізико-механічних та теплофізичних властивостей поверхневого шару, що дозволяє збільшити зносостійкість робочих поверхонь інструменту із ПНТМ на основі КНБ. Правильний вибір складу захисного покриття для конкретної операції обробки дає можливість підвищити продуктивність обробки та стійкість різальних інструментів із ПНТМ на основі КНБ.

Ключові слова: процес різання, різальний інструмент із ПНТМ на основі КНБ, зносостійкі покриття, аморфний BN.

УДК 621.9; 519.2

До питання аналізу точності технологічного процесу обробки поршневого пальця / А.П. Тарасюк, Н. Ю. Ламнауер // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – № 40(1149). – С. 11-13. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-004X.

Розв'язується задача технології машинобудування, яка стосується аналізу точності технологічного процесу обробки. Запропоновано новий метод знаходження оцінок параметрів моделі розподілу випадкової величини – розміру. Надано формулу для розрахунку максимального відсотку якості деталей при обробці за застосованою технологією. Знайдені оцінки пропонується використовувати в розрахунковій формулі для аналізу точності процесу обробки за показником, що досліджується. Результати досліджень застосовувалися для оцінки якості процесу обробки пальця поршня автомобіля ВАЗ.

Ключові слова: якість, точність, розмір, обробка, аналіз.

УДК 621.865.6

Температури і температурні напруження при дії іонів на магнісні сплави і можливість отримання наноструктур / Г.І. Костюк, Бехзад Размджуй, О.О. Бруйка // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – № 40(1149). – С. 14-20. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-004X.

У роботі були досліджені поля температур, швидкості їх зростання та температурних напружень при дії іонів B^+ , N^+ , C^+ , Al^+ , V^+ , Cr^+ , O^+ , Ni^+ , Zr^+ , Mo^+ , Hf^+ , W^+ , Ta^+ , Pt^+ із зарядом від одного до трьох на магнісні сплави. Так, діапазон максимальних температур лежить у межах від $1,82 \cdot 10^3$ до 3,9 К, а швидкість зміни температури змінюється від 10^{14} до 10^{17} К/с. Дослідження залежності цих величин від енергії іонів і заряду дозволило знайти області в об'ємі матеріалу, де реалізуються температури, достатні для утворення наноструктур, але в той же час вони не призводять до зростання розміру зерна, тобто отримано технологічні параметри потоків іона, які забезпечують отримання наноструктур.

Ключові слова: температура, швидкості зростання температури, температурні напруження, іони, магнісні сплави, заряд, енергія іонів.

УДК 621.95

Вплив кількості наповнювача на якість отворів при свердленні композитів / Г.Л. Хавін, І.О. Есип // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – № 40(1149). – С. 21-25. – Бібліогр.: 17 назв. – ISSN 2079-004X.

Розглянуто вплив кількості наповнювача на шорсткість та розшарування у отворах при свердленні багатошарових композиційних матеріалів. Надано аналіз експериментальних і теоретичних досліджень утворення розшарувань та шорсткості у заготовці при свердленні. Описано механізм появи таких дефектів і сучасний стан проблеми прогнозування їх кількісних характеристик. Проаналізовано вплив різних технологічних факторів на зменшення величини дефектів та шляхи їх мінімізації в процесі свердлення.

Ключові слова: дефекти свердлення, шарові композити, шорсткість при свердленні.

УДК 681.518.3

Аналіз характеристик двохступінчастої інформаційно-виміральної системи покоординатного задавання параметрів алмазного шліфування / О.Ф. Єнікєєв, Ф.М. Євсюкова, О.Ю. Приходько // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – № 40(1149). – С. 26-21. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-004X.

На основі ієрархічного принципу, методів безпосереднього цифрового та покоординатного управління, непрямих вимірювань якості поверхні деталі з використанням сигналу девіації швидкості обертання шліфувального круга розроблено тривимірну двохступінчасту інформаційно-виміральною систему покоординатного задавання параметрів алмазного шліфування. Побудовано математичні моделі апаратних засобів з використанням дискретного перетворення Лапласа. Мінімізацією квадратичного критерію якості з використанням еталонних моделей каналів інформаційно-виміральної системи отримано передатні функції пристроїв обробки вхідної інформації. Складено схеми комп'ютерного моделювання процесів перетворення апаратними засобами інформаційно-виміральної системи вхідних сигналів. Встановлено ефективність апаратних засобів, які розроблено.

Ключові слова: апаратні засоби, інформаційно-вимірвальна система, непрямі вимірювання, комп'ютерне моделювання.

УДК 621.9.044

Об'єм нанокластера і глибини його залягання при дії іонів різних енергій, сортів і зарядів на титановий сплав ВТ-1 / Г.І. Костюк, Т.О. Постельник, О.М. Мелкозьорова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – № 40(1149). – С.32-38. – Бібліогр.: 18 назв. – ISSN 2079-004X.

Проведено дослідження величини об'єму нанокластера і глибини його залягання в залежності від енергії, заряду і сорти іонів (B^+ , N^+ , C^+ , Al^+ , V^+ , Cr^+ , O^+ , Ni^+ , Zr^+ , Mo^+ , Hf^+ , W^+ , Ta^+ , Pt^+), що дозволяє визначити склад іонів, їх енергії і заряди для отримання наноструктур в необхідному шарі, а з урахуванням необхідної густини іонного струму оцінити практично всі технологічні параметри для отримання шару необхідної товщини та фізико-механічних характеристик у титановому сплаві.

Ключові слова: об'єм нанокластера, іони, глибина залягання, густина іонного струму, титановий сплав, наноструктури.

УДК 621.039.56

Моделювання процесу ударного деформування пластин напівсферичним ударником / С.С. Добровольський, С.С.Гнучіх,

Л.Г. Добровольська // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – №40(1149). – С.39-42. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-004X.

Проведено комп'ютерне моделювання процесу ударного деформування пластин, що складаються з матеріалів різної товщини, напівсферичним ударником. У зв'язку з підвищенням швидкостей обробки деталей машин, захисні конструкції у верстатобудуванні потребують підвищення ударної стійкості, при одночасному зниженні матеріаломісткості. Розглядалася задача контактної динамічної деформування пластини при великих швидкостях протікання процесу. Для високошвидкісного процесу деформування враховувалася залежність фізико-механічних властивостей матеріалу від рівня швидкостей деформації. Комп'ютерне моделювання процесу проводилося спеціалізованим програмним комплексом ANSYS в модулі " Explicit Dynamics " заснованим на застосуванні методу кінцевих- елементів в умовах високих швидкостей. Аналіз отриманих даних показав переваги застосування багатощарових пластин з керамічним шаром.

Ключові слова: математичне моделювання, метод кінцевих елементів, багатощарові пластини.

УДК 621.923

Умови високоефективного шліфування з початковим натягом у технологічній системі / Ф.В. Новіков, І.О. Рябенков // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – №40(1149). – С.43-46. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-004X.

Аналітично описаний характер зміни в часі сили різання, інтенсивності знімання матеріалу й величини пружного переміщення при шліфуванні з початковим натягом у технологічній системі. Показано, що ці параметри зменшуються із часом обробки, забезпечуючи необхідні показники точності та якості оброблюваних поверхонь. Це вказує на ефективність її застосування на остаточному етапі шліфування для забезпечення високої точності обробки.

Ключові слова: шліфування, технологічна система, початковий натяг, точність обробки, сила різання, пружне переміщення, припуск.

УДК 621.373

Перспективи отримання наноструктур при дії імпульсного лазерного випромінювання на сталі / Г.І. Костюк, В.М. Павленко, Ю.В. Широкий // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – № 40 (1149). – С. 47-52. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-004X.

На основі рішення спільної задачі теплопровідності та термопружності отримано поля температур при дії імпульсного лазерного випромінювання на сталі 20, 40, 45, 40X, У8, У12 з урахуванням критеріїв: потрібні температури 500-1500 К, необхідні швидкості наростання температур – більше 10^7 К/с. Визначено технологічні параметри лазерної обробки (щільність теплового потоку і час його дії) для утворення наноструктур.

Ключові слова: наноструктури, лазерне випромінювання, сталі.

УДК 621.923

Закономірності формування параметрів теплового процесу при шліфуванні / Кленов О. С. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – № 40 (1149). – С. 53-56. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X.

Отримано аналітичні залежності для визначення температури різання, глибини проникнення тепла в адіабатичний стержень і часу нагрівання адіабатичних стержнів, безліччю яких представлений припуск, що знімається, при плоскому шліфуванні. Установлено, що з часом обробки температура різання збільшується, асимптотично наближаючись до постійного значення. Глибина проникнення тепла в адіабатичний стержень і час нагрівання адіабатичного стержня також змінюються за законом зміни температури різання.

Ключові слова: процес шліфування, багатопрохідне шліфування, температура різання, тепловий процес, адіабатичний стержень, глибина шліфування.

УДК 621.923

Технологічне забезпечення точності й шорсткості поверхні при обробці отвору / Ф.В. Новіков, Р.М. Мінчев // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – № 40 (1149). – С. 57-60. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-004X.

Обґрунтовано умови зменшення шорсткості поверхні оброблюваного отвору за рахунок застосування схеми внутрішнього шліфування з розташуванням осі обертання круга перпендикулярно осі обертання оброблюваного отвору. Розкрито закономірності утворення погіршностей обробки отворів при внутрішньому шліфуванні та хонінгуванні. Обґрунтовано можливість підвищення точності обробки за рахунок створення пружної системи в конструкції хона, а також показано ефективність застосування гнучкого круга при внутрішньому шліфуванні.

Ключові слова: оброблюваний отвір, абразивна обробка, внутрішнє шліфування, хонінгування, хон, режими шліфування, погіршеності обробки, шорсткість поверхні.

УДК 865.6

Про можливість визначення енергії створення зерна при отриманні наноструктур у випадку дії іонів різних сортів, зарядів і енергій на конструкційні матеріали / Г.І. Костюк, А.В. Матвєєв, Е.А. Воляк // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – № 40(1149). – С. 61-65. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2079-004X.

У роботі розглянуто можливість оцінки енергії, потрібної на кристалізацію, тобто створення зерна при отриманні наноструктур у разі дії іонів різних сортів, енергій і зарядів. На основі квантово-механічного підходу з урахуванням кулонівського відштовхування і іонного зв'язку знайдені енергії кристалізації кластеру. Число частинок в кластері розраховане на основі рішення зв'язаної задачі теплопровідності та термопружності. Показано, що, прийнявши енергію атомізації, рівної енергії кристалізації, для легких іонів – ця енергія близька до енергії діючих іонів, тоді як для важких вона незначна і її можна не враховувати.

Ключові слова: енергія кристалізації, наноструктури, іони, нанокластер.

УДК 621.923

Продуктивність магнітно-абразивної обробки кінцевого і осового інструменту на роторних верстатах / В. Н. Гейчук, В. А. Мосейчук // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – № 40(1149). – С. 66-72. – Бібліогр.: 20 назв. – ISSN 2079-004X.

У даній роботі виконано порівняльний аналіз продуктивності магнітно-абразивної обробки на РТК з магнітними системами "кільцева ванна" двох типів. Перша з них - магнітна система з радіальним завантаженням з обертовими полюсними наконечниками на постійних магнітах, друга - електромагнітна система з торцевим завантаженням з нерухомими полюсними наконечниками. В результаті проведених досліджень встановлено, що більш продуктивним є РТК, що складається із верстата з шестишпіндельною роторною головкою і магнітної системи другого типу. При цьому величина допоміжного часу менша в РТК, що складається з магнітної системи першого типу і одношпіндельного блоку в захваті робота.

Ключові слова: магнітно-абразивна обробка, роторний верстат, робот, продуктивність, осьовий інструмент.

УДК 621.039.56

Аспекти застосування адсорбційних осушувачів для забезпечення стислим повітрям обладнання плазмового різання / С.С. Доброворський, Б.О. Алексєнко, Л.Г. Добровольська // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – № 40(1149). – с. 73-77. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-004X.

Проведене практичне експериментальне дослідження впливу якості стислого повітря, використовуваного для формування плазмового струменя в процесі плазмового різання сталі з застосуванням неактивного газу. У зв'язку з широким поширенням технології плазмового різання в сучасному промисловому виробництві вказана технологія потребує вдосконалення з метою підвищення якості виробленої продукції та зниження виробничих витрат підприємства. Результат дослідження показав необхідність застосування адсорбційних осушувачів в процесі підготовки повітря для апаратів плазмової різки.

Ключові слова: плазмова різка, осушувач, стисле повітря, вологовміст, адсорбція, регенерація.

УДК 621.9.06-9.11

Підвищення точності металорізальних верстатів на основі чисельних розрахунків еліпсоїдів жорсткості / В.Б. Струтинський, В.М. Чуприна, О.Я. Юрчишин // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – № 40(1149). – с. 78-84. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X.

На основі тензорно-геометричного підходу до опису жорсткості основних підсистем верстату складено модель просторової жорсткості його пружної системи. Розроблено алгоритм знаходження статичної жорсткості (податливості) верстату в довільному напрямку тривимірному простору і побудовано поверхні статичної жорсткості.

Ключові слова: металорізальний верстат, пружна система, підсистема, жорсткість, тензор, просторова модель.

УДК 621.793:621.9.025

Осаждение качественного равнотолщинного вакуумно-дугового покрытия на твердосплавный режущий инструмент при обработке больших партий / О. О. Баранов, Г. И. Костюк // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – № 40 (1149). – С. 85-89. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-004X.

Запропонована схема технологічного пристрою для осадження якісного рівнотовщинного вакуумно-дугового покриття на твердосплавний ріжучий інструмент при обробці великих партій на підкладках діаметром до 400 мм. Керування потоками плазми вакуумно-дугового джерела здійснюється системою магнітних пасток на шляху розповсюдження потоку плазми, а для іонного очищення та попереднього нагріву виробів використаний магнетронний розряд. Керуючі магнітні поля створюються системою електромагнітів, які розміщені під підкладкою.

Ключові слова: плазмово-іонна обробка, ріжучий інструмент, рівнотовщинні покриття.

УДК 66.063

Использование проточных кавитационных активаторов для повышения эффективности СОЖ / А.В. Фесенко, В.Д. Хіцан, Н.П.Скидан // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – №40 (1149). С. 90-95. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X.

У статті запропонований спосіб активації змашувально-охолоджуючої рідини (ЗОР) в проточних гідродинамічних пристроях, що дозволяє виконувати інтенсивне перемішування і квітанційну обробку емульсій, як на стадії її приготування, так і при відновленні. Дан аналіз процесів, що відбуваються при проходженні потоку через щілеві змішувачі та квітанційні насадки. Розроблено стенд для експериментального дослідження параметрів потоку при постійній енергії на вході. Проведено експериментальне дослідження проточних змішувачів і квітанційних насадок, на підставі якого розроблена установка для круглошліфувального верстата, що забезпечує отримання гомогенної і дрібнодисперсної ЗОР.

Ключові слова: шліфувальний верстат, змішувачі, активація, тиск, витрата рідини, квітація, гідродинамічний вплив, ЗОР.

УДК 621.9

Аналіз компоновки сучасних агрегатних верстатів з поворотно-ділильним барабаном / О.А.Пермяков, Ю.В.Тимофійсв, І.Е.Яковенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – №40 (1149). С. 96-101. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-004X.

У промислово розвинених країнах основу високоорганізованих виробництв становить технологічне обладнання, створюване за агрегатно-модульним принципом. Створенням високопродуктивних багатопозиційних агрегатних верстатів займаються ряд провідних верстатобудівних фірм, перспективні компоновки деяких з них розглянуті в даній статті. Виконано огляд сучасних багатопозиційних агрегатних верстатів з горизонтальною віссю транспортування заготовки в процесі обробки. Розглянуто технічні характеристики, технологічні можливості та особливості компоновки.

Ключові слова: агрегатний верстат, компоновка, поворотно-ділильний барабан.

УДК 621.9

Технологическое обеспечение трения качения и трения скольжения в зубчатых передачах / А.А. Ключко, М.И. Гасанов, С.В. Басова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – №40 (1149). С. 102-107. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-004X.

У статті розглянуто умови контактування циліндричних зубчастих передач і технологічні методи воздействия при формуванні евольвентної поверхні зубів при яких відбувається прослизання зубів однієї шестерні щодо профілю зуба сопрягаемого колеса і сил тертя-ковзання. Втрата енергії на тертя в зубчастих передачах доходить до 10% від усієї втрати енергії на подолання тертя. У зубчастій передачі втрата енергії відбувається в зубцях внаслідок їх тертя при невідповідності точності виготовлення зубчастих передач за нормами кінематичної точності, нормами плавності, нормам бічного зазору відповідно до вимог ГОСТ 1643-81 і особливості трибологічного контактування евольвентних сполучених поверхонь. Показано, що при силових розрахунках циліндричних зубчастих коліс необхідно враховувати крім динамічних навантажень і зусиль тертя кочення-ковзання в зубчастих передачах. В циліндричних зубчастих передачах тертя кочення значно менше тертя ковзання, тому однією з превалюючих наукових напрямів є зменшення та зведення до мінімуму ділянки ковзання деталей евольвентних профілів зубчастих коліс з урахуванням зміни параметрів стану поверхневого шару зубців: шорсткості, хвилястості, твердості, фізико-механічних властивостей матеріалу зубчастих коліс.

Ключові слова: трибологія, контактування, зубчасті передачі, технологічне воздействие, формообразовани, тертя кочення-ковзання.

УДК 658.512

Дослідження продуктивності і надійності складання вузла «гідроагрегат» в умовах автоматизованого виробництва / О.М. Шелковий, М.С. Мартинов, О.В. Набока // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – №40 (1149). С. 108-112. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X.

Наведено аналіз проблем та існуючих методів підвищення продуктивності складання вузлів. Для підвищення продуктивності та автоматизації складання вузлів запропонована математична модель системи імітаційного моделювання виробничих систем складання вузлів. Прогнозується підвищення продуктивності складання вузлів до 20% при використанні математичної моделі систем імітаційного моделювання виробничих систем.

Ключові слова: складання вузлів, підвищення продуктивності, математична модель, систем імітаційного моделювання виробничих систем.

УДК 621.923

Дослідження структурних перетворень та їх вплив на поверхневий шар при зубошлифуванні / Степанов М. С., Ключко О. О., Анциферова О. О. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – №40 (1149). С. 113-116. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-004X.

Одним з основним фактором забезпечення високої довговічності загартованих зубчатих коліс є вивчення стану напруги в поверхневому шарі, определяючимися виглядом і умовами технологічного впливу в процесі зубошлифування. Розглянуто вплив залишкових напружень на міцність зубчастих коліс в залежності від тепла, що виникає в зоні різання і призводять до утворення розтягуючих напружень, зміни твердості та структури. Причиною структурних напружень є зміни обсягу по перерізу матеріалу, викликані перетворення аустеніту меншої питомої обсягу в структурі більшої питомої обсягу. Структурні залишкові напруження в поверхневому шарі зубчастих коліс при різних схемах зубошлифування з'являються завжди разом з тепловими напруженнями і викликають виникнення розтягуючих напружень, а в серцевині напруж стиснення.

Ключові слова: зубошлифування, поверхневий шар, технологічне вплив, загартоване зубчасте колесо.

РЕФЕРАТЫ

УДК 621.865.6

Получение нано- и субмикроструктур при действии лазерного излучения на РИ из твердых сплавов / Г.И. Костюк // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 40(1149). – С. 4-6. – Бібліогр.: 23 назв. – ISSN 2079-004X.

Экспериментально определен размер зерна с помощью растровой микроскопии (РЭМ-106), а также проведено теоретическое исследование объема и размера зерна наноструктур при действии ионизирующего облучения на режущий инструмент (РИ) из твердых сплавов Т15К6, ТН20, минералокерамики, Эльбор-Р, сравнение результатов которых с экспериментом по величине размера зерна позволяет говорить об адекватности теоретической модели определения размера зерна.

Ключевые слова: размер зерна, растровая электронная микроскопия, лазерное излучение, объем нанокластера.

УДК 621.91

Износ и стойкость режущих инструментов из ПКНБ с износостойким покрытием на основе нитрида бора в аморфном состоянии / С.Ан. Клименко, С.А. Клименко, В.М. Береснев // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 40(1149). – С. 7-10. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-004X.

Одним из самых эффективных методов повышения стойкости режущих инструментов с ПСТМ на основе КНБ, является нанесение на рабочие поверхности инструмента функциональных наноструктурных износостойких покрытий. Применение таких покрытий дает возможность снизить температуру резания и улучшить работоспособность режущего инструмента, благодаря целенаправленному изменению физико-механических и теплофизических свойств поверхностного слоя, что позволяет увеличить износостойкость рабочих поверхностей инструмента с ПСТМ на основе КНБ. Правильный выбор состава защитного покрытия для конкретной операции обработки дает возможность повысить производительность обработки и стойкость режущих инструментов с ПСТМ на основе КНБ.

Ключевые слова: процесс резания, режущий инструмент с ПСТМ на основе КНБ, износостойкие покрытия, аморфный BN.

УДК 621.9; 519.2

К вопросу анализа точности технологического процесса обработки поршневого пальца / А.П. Тарасюк, Н. Ю. Ламнаур // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 40(1149). – С. 11-13. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-004X.

Решается задача технологии машиностроения, касающаяся анализа точности технологического процесса обработки. Предложен новый метод нахождения оценок параметров модели распределения случайной величины – размера. Дана формула для расчета максимального процента качества деталей при обработке по применяемой технологии. Найденные оценки предлагается применять в расчетных формулах для анализа точности процесса обработки по исследуемому показателю. Результаты исследований применялись для оценки качества процесса обработки пальца поршня автомобиля ВАЗ.

Ключевые слова: качество, точность, размер, обработка, анализ.

УДК 621.865.6

Температуры и температурные напряжения при действии ионов на магниевые сплавы и возможность получения наноструктур / Г.И. Костюк, Бехзад Размджун, О.О. Бруйка // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 40(1149). – С. 14-20. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-004X.

В работе были исследованы поля температуры, скорости их возрастания и температурных напряжений при действии ионов V^+ , N^+ , C^+ , Al^+ , V^+ , Cr^+ , O^+ , Ni^+ , Zr^+ , Mo^+ , Hf^+ , W^+ , Ta^+ , Pt^+ с зарядом от одного до трех на магниевые сплавы. Так, диапазон максимальных температур лежит в пределах от $1,82 \cdot 10^3$ до 3,9 К, а скорость изменения температуры меняется от 10^{14} до 10^{17} К/с. Исследование зависимости этих величин от энергии ионов и заряда позволило найти области в объеме материала, где реализуются температуры, достаточные для образования наноструктур, но в то же время они не приводят к росту размера зерна, то есть получены технологические параметры потоков иона, которые обеспечивают получение наноструктур.

Ключевые слова: температура, скорости нарастания температуры, температурные напряжения, ионы, магниевые сплавы, заряд и энергия ионов.

УДК 621.95

Влияние количества наполнителя на качество отверстий при сверлении композитов / Г.Л. Хавин, И.О. Есып // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 40(1149). – С. 21-25. – Бібліогр.: 17 назв. – ISSN 2079-004X.

Рассмотрено влияние количества наполнителя на шероховатость и расслоение в отверстиях при сверлении многослойных композиционных материалов. Представлен анализ экспериментальных и теоретических исследований образования расслоения и шероховатости в заготовке при сверлении. Описан механизм появления таких дефектов и современное состояние проблемы прогнозирования их количественных характеристик. Проанализировано влияние различных технологических факторов на уменьшение величины дефектов.

Ключевые слова: дефекты сверления, слоистые композиты, шероховатость при сверлении.

УДК 681.518.3

Анализ характеристик двухступенчатой информационно-измерительной системы покоординатного задания параметров алмазного шлифования / А.Ф. Еникеев, Ф.М. Евсюкова, О.Ю. Приходько // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – № 40(1149). – С. 26-31. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-004X.

На основе иерархического принципа, методов непосредственного цифрового и покоординатного управления разработана трехмерная двухступенчатая информационно-измерительная система покоординатного задания параметров алмазного шлифования. Построены математические модели аппаратных средств с использованием дискретного преобразования Лапласа. Минимизацией квадратичного критерия качества с применением эталонных моделей каналов информационно-измерительной системы получены передаточные функции устройств обработки входной информации. Составлены схемы компьютерного моделирования процессов преобразования аппаратными средствами информационно-измерительной системы входных сигналов. Установлена эффективность разработанных аппаратных средств.

Ключевые слова: аппаратные средства, информационно-измерительная система, косвенные измерения, компьютерное моделирование.

УДК 621.9.044

Объем нанокластера и глубины его залегания при действии ионов разных энергий, сортов и зарядов на титановый сплав ВТ-1 / Г.И. Костюк, Т.А. Постельник, О.М. Мелкозерова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – № 40 (1149). – С. 32-38. – Бібліогр.: 18 назв. – ISSN 2079-004X.

Проведены исследования величины объема нанокластера и глубины его залегания в зависимости от энергии, заряда и сорта ионов (B^+ , N^+ , C^+ , Al^+ , V^+ , Cr^+ , O^+ , Ni^+ , Zr^+ , Mo^+ , Hf^+ , W^+ , Ta^+ , Pt^+), что позволяет определить состав ионов, их энергии и заряды для получения наноструктур в требуемом слое, а с учетом необходимой плотности ионного тока оценить практически все технологические параметры для получения слоя требуемой толщины и физико-механических характеристик в титановом сплаве ВТ-1.

Ключевые слова: объем нанокластера, ионы, глубина залегания, плотность ионного тока, титановый сплав, наноструктуры.

УДК 621.039.56

Моделирование процесса ударного деформирования пластин полусферическим ударником / С.С. Добротворский, С.С. Гнучих, Л.Г. Добровольская // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – № 40 (1149). – С. 39-42. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-004X.

Проведено компьютерное моделирование процесса ударного деформирования пластин, состоящих из материалов различной толщины, полусферическим ударником. В связи с повышением скоростей обработки деталей машин, защитные конструкции в станкостроении нуждаются в повышении ударной стойкости, при одновременном снижении материалоемкости. Рассматривалась задача контактного динамического деформирования пластины при больших скоростях протекания процесса. Для высокоскоростного процесса деформирования учитывалась зависимость физико-механических свойств материала от уровня скоростей деформации. Компьютерное моделирование процесса проводилось специализированным программным комплексом ANSYS в модуле "Explicit Dynamics" основанным на применении метода конечных элементов в условиях высоких скоростей. Анализ полученных данных показал преимущества применения многослойных пластин с керамическим слоем.

Ключевые слова: математическое моделирование, метод конечных элементов, многослойные пластины.

УДК 621.92

Условия высокоэффективного шлифования с начальным натягом в технологической системе / Ф. В. Новиков, И. А. Рябенков // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – №40(1149). – С.43-46. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-004X.

Аналитически описан характер изменения во времени силы резания, интенсивности съема материала и величины упругого перемещения при шлифовании с начальным натягом в технологической системе. Показано, что эти параметры уменьшаются с течением времени обработки, обеспечивая требуемые показатели точности и качества обрабатываемых поверхностей. Это указывает на эффективность ее применения на окончательном этапе шлифования для обеспечения высокой точности обработки.

Ключевые слова: шлифование, технологическая система, начальный натяг, точность обработки, сила резания, упругое перемещение, припуск.

УДК 621.373

Перспективы получения наноструктур при действии импульсного лазерного излучения на стали / Г.И. Костюк, В.Н. Павленко, Ю.В. Широкий // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – № 40(1149). – С. 47-52. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-004X.

На основе решения совместной задачи теплопроводности и термоупругости получены поля температур при действии импульсного лазерного излучения на стали 20, 40, 45, 40X, У8, У12 с учетом критериев: требуемые температуры – 500...1500 К, необходимые скорости нарастания температур – более 10^7 К/с. Определены технологические параметры лазерной обработки (плотность теплового потока, время его действия) для образования наноструктур.

Ключевые слова: наноструктуры, лазерное излучение, стали.

УДК 621.923

Закономерности формирования параметров теплового процесса при шлифовании / О. С. Кленов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – № 40(1149). – С. 53-56. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-004X.

Получены аналитические зависимости для определения температуры резания, глубины проникновения тепла в адиабатический стержень и времени нагрева адиабатических стержней, множеством которых представлен снимаемый припуск при плоском шлифовании. Установлено, что во времени температура резания увеличивается, асимптотически приближаясь к постоянному значению. Глубина проникновения тепла в адиабатический стержень и время нагрева адиабатического стержня также изменяются по закону изменения температуры резания.

Ключевые слова: процесс шлифования, многопроходное шлифование, температура резания, тепловой процесс, адиабатический стержень, глубина шлифования.

УДК 621.923

Технологическое обеспечение точности и шероховатости поверхности при обработке отверстия / Ф. В. Новиков, Р. М. Минчев // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – № 40(1149). – С. 53-60. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-004X.

Обоснованы условия уменьшения шероховатости поверхности обрабатываемого отверстия за счет применения схемы внутреннего шлифования с расположением оси вращения круга перпендикулярно оси вращения обрабатываемого отверстия. Раскрыты закономерности образования погрешностей обработки отверстий при внутреннем шлифовании и хонинговании. Обоснована возможность повышения точ-

ности обработки за счет создания упругой системы в конструкции хона, а также показана эффективность применения гибкого круга при внутреннем шлифовании.

Ключевые слова: обрабатываемое отверстие, абразивная обработка, внутреннее шлифование, хонингование, хон, режимы шлифования, погрешности обработки, шероховатость поверхности.

УДК 865.6

О возможности определения энергии образования зерна при получении наноструктур в случае действия ионов различных сортов, зарядов и энергий на конструкционные материалы / Г.И. Костюк, А.В. Матвеев, Е.А. Воляк // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – № 40(1149). – С. 61-65. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2079-004X.

В работе рассмотрена возможность оценки энергии, потребной на кристаллизацию, т.е. образование зерна при получении наноструктур в случае действия ионов различных сортов, энергий и зарядов. На основе квантово-механического подхода с учетом кулоновского отталкивания и ионной связи найдены энергии кристаллизации кластера. Число частиц в кластере рассчитано на основе решения совместной задачи теплопроводности и термоупругости. Показано, что, приняв энергию атомизации, равной энергии кристаллизации, для легких ионов – эта энергия близка к энергии действующих ионов, тогда как для тяжелых она незначительна и ее можно не учитывать.

Ключевые слова: энергия кристаллизации, наноструктуры, ионы, нанокластер.

УДК 621.923

Производительность магнитно-абразивной обработки концевой и осевой инструмента на роторных станках / В. Н. Гейчук, В. А. Мосейчук // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – № 40(1149). – С. 66-72. – Бібліогр.: 20 назв. – ISSN 2079-004X.

В данной работе выполнен сравнительный анализ производительности магнитно-абразивной обработки на РТК с магнитными системами "кольцевая ванна" двух типов. Первая из них - магнитная система с радиальной загрузкой с вращающимися полюсными наконечниками на постоянных магнитах, вторая - электромагнитная система с торцевой загрузкой с неподвижными полюсными наконечниками. В результате проведенных исследований определено, что более продуктивным является РТК, состоящий из станка со шестипиндельной роторной головкой и магнитной системы второго типа. При этом величина вспомогательного времени меньше в РТК, который состоит из магнитной системы первого типа и одношпиндельного блока в хвате робота.

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка, роторный станок, робот, производительность, осевой инструмент.

УДК 621.039.56

Аспекты применения адсорбционных осушителей для обеспечения сжатым воздухом оборудования плазменной резки. / С.С. Добротворский, Б.А. Алексенко, Л.Г. Добровольская // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – № 40(1149). – С. 73-77. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-004X.

Проведено практическое экспериментальное исследование влияния качества сжатого воздуха, используемого для формирования плазменной струи в процессе плазменного резания стали с применением неактивного газа. В связи с широким распространением технологии плазменной резки в современном промышленном производстве, указанная технология нуждается в совершенствовании с целью повышения качества производимой продукции и снижения производственных затрат предприятия. Результат исследования показал необходимость применения адсорбционных осушителей в процессе подготовки воздуха для аппаратов плазменной резки.

Ключевые слова: плазменная резка, осушитель, сжатый воздух, влагосодержание, адсорбция, регенерация.

УДК 621.9.06-9.11

Повышение точности металлорежущих станков на основе численных расчетов эллипсоидов жесткости / В.Б. Стругинский, В.М. Чуприна, О.Я. Юрчишин // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – № 40(1149). – С. 78-84. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X.

На основе тензорно-геометрического подхода к описанию жесткости основных подсистем станка составлена модель пространственной жесткости его упругой системы. Разработан алгоритм нахождения статической жесткости (податливости) станка в произвольном направлении трехмерного пространства и построены поверхности статической жесткости.

Ключевые слова: металлорежущий станок, упругая система, подсистема, жесткость, тензор, пространственная модель.

УДК 621.793:621.9.025

Осаждение качественного равнотолщинного вакуумно-дугового покрытия на твердосплавный режущий инструмент при обработке больших партий / О. О. Баранов, Г. И. Костюк // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – № 40 (1149). – С. 85-89. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-004X.

Предложена схема технологического устройства для осаждения качественного равнотолщинного вакуумно-дугового покрытия на твердосплавный режущий инструмент при обработке больших партий на подложках диаметром до 400 мм. Управление потоками плазмы вакуумно-дугового источника осуществляется путем создания системы магнитных ловушек на пути распространения потока плазмы, а для ионной очистки и предварительного разогрева изделий используется магнетронный разряд. Управляющие магнитные поля создаются системой электромагнитов, размещенных под подложкой.

Ключевые слова: плазменно-ионная обработка, режущий инструмент, равнотолщинные покрытия.

УДК 66.063

Использование проточных кавитационных активаторов для повышения эффективности СОЖ / А.В. Фесенко, В.Д. Хицан, Н.П.Скидан // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X.: НТУ «ХП», 2015. – №40 (1149). С. 90-95. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X.

В статье предложен способ активации СОЖ в проточных гидродинамических устройствах, позволяющий выполнять интенсивное перемешивание и квантационную обработку эмульсий, как на стадии ее приготовления, так и при восстановлении. Дан анализ процессов, происходящим при прохождении потока через шелевые смесители и квантационные насадки. Разработан стенд для экспериментального исследования параметров потока при постоянной энергии на входе. Проведено экспериментальное исследование проточных смесителей и квантационных насадок, на основании которого разработана установка для круглошлифовального станка, обеспечивающая получение однородной и мелкодисперсной СОЖ.

Ключевые слова: шлифовальный станок, смесители, активация, давление, расход жидкости, кавитация, гидродинамическое воздействие, СОЖ.

УДК 621.9

Анализ компоновок современных агрегатных станков с поворотным-делительным барабаном / А.А.Пермяков, Ю.В.Тимофеев, И.Э.Яковенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X.: НТУ «ХП», 2015. – №40 (1149). С. 96-101. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-004X.

В промышленно развитых странах основу высокоорганизованных производств составляет технологическое оборудование, создаваемое по агрегатно-модульному принципу. Созданием высокопроизводительных многопозиционных агрегатных станков занимаются ряд ведущих станкостроительных фирм, перспективные компоновки некоторых из них рассмотрены в данной статье. Выполнен обзор современных многопозиционных агрегатных станков с горизонтальной осью транспортирования заготовки в процессе обработки. Рассмотрены технические характеристики, технологические возможности и особенности компоновки.

Ключевые слова: агрегатный станок, компоновка, поворотный-делительный барабан.

УДК 621.9

Технологическое обеспечение трения качения и трения скольжения в зубчатых передачах / А.А. Ключко, М.И. Гасанов, Е.В. Басова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – №40 (1149). С. 102-107. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-004X.

В статье рассмотрены условия контактирования цилиндрических зубчатых передач и технологические методы воздействия при формировании эвольвентной поверхности зубьев при которых происходит проскальзывание зубьев одной шестерни относительно профиля зуба сопрягаемого колеса и сил трения-скольжения. Потеря энергии на трение в зубчатых передачах доходит до 10% от всей потери энергии на преодоление трения. В зубчатой передаче потеря энергии происходит в зубьях вследствие их трения при несоответствии точности изготовления зубчатых передач по нормам кинематической точности, нормам плавности, нормам бокового зазора согласно требованиям ГОСТ1643-81 и особенностью трибологического контактирования эвольвентных сопрягаемых поверхностей. Показано, что при силовых расчетах цилиндрических зубчатых колес необходимо учитывать помимо динамических нагрузок и усилия трения качения-скольжения в зубчатых передачах. В зубчатых цилиндрических передачах трение качения значительно меньше трения скольжения, поэтому одной из преулирующих научных направлений является уменьшение и сведение до минимума участка скольжения сопрягаемых эвольвентных профилей зубчатых колес с учетом изменения параметров состояния поверхностного слоя зубьев: шероховатости, волнистости, твердости, физико-механических свойств материала зубчатых колес.

Ключевые слова: трибология, контактирование, зубчатые передачи, технологическое воздействие, формообразование, трение качения-скольжения.

УДК 658.512

Дослідження продуктивності і надійності складання вузла «гідроагрегат» в умовах автоматизованого виробництва / О.М. Шелковий, М.С. Мартинов, О.В. Набока // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – №40 (1149). С. 108-112. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X.

Наведено аналіз проблем та існуючих методів підвищення продуктивності складання вузлів. Для підвищення продуктивності та автоматизації складання вузлів запропонована математична модель системи імітаційного моделювання виробничих систем складання вузлів. Прогнозується підвищення продуктивності складання вузлів до 20% при використанні математичної моделі систем імітаційного моделювання виробничих систем.

Ключові слова: складання вузлів, підвищення продуктивності, математична модель, систем імітаційного моделювання виробничих систем.

УДК 621.923

Исследование структурных превращений и их влияние на поверхностный слой при зубошлифовании / Степанов М. С., Ключко А. А., Анцыферова О. А. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – №40 (1149). С. 113-116. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-004X.

Одним из основополагающим фактором обеспечения высокой долговечности закаленных зубчатых колес является изучение состояния напряжений в поверхностном слое, определяющимися видом и условиями технологического воздействия в процессе зубошлифования. Рассмотрено влияние остаточных напряжений на прочность зубчатых колес в зависимости от тепла, возникающем в зоне резания и приводящие к образованию растягивающих напряжений, изменению твердости и структуры. Причиной структурных напряжений являются изменения объема по сечению материала, вызванные превращением аустенита меньшего удельного объема в структуре большего удельного объема.

Ключевые слова: зубошлифование, поверхностный слой, технологическое воздействие, закаленное зубчатое колесо.

ABSTRACTS

Getting nano- and submicrostructure under the action of laser radiation on the RI Carbide / G.I. Kostyuk // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2015. – № 40(1149). – P.4-6 – Bibliogr.: 23. – ISSN 2079-004X.

Experimentally determined grain size using a scanning electron microscopy (SEM-106), as well as a theoretical study of the volume and the grain size of nanostructures under the influence of ionizing radiation on the cutting tools (RI) Carbide T15K6, TN20, Elbor-R, comparing the results with experimental data which largest grain size lets talk about the adequacy of the theoretical model for determining the amount of grain.

Keywords: grain size, scanning electron microscopy, laser radiation, the amount of the nanocluster.

Wear and cutting tools with PKNB of wear-resistant coatings based on boron nitride in the amorphous state / S.An. Klimenko, S.A. Klimenko, V.M. Beryesnev // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2015. – № 40(1149). – P. 7-10 – Bibliogr.: 4. – ISSN 2079-004X.

One of the most effective methods of the wear-resistance increasing of PCBN cutting tools is creation of functional nanostructured wear-resistant coatings on the working surfaces of the tool. The application of such coatings provides an opportunity to reduce cutting temperature and improve the performance of cutting tools, due to the purposeful change of mechanical and thermal properties of the surface layer, which allows one to increase the wear resistance of the working surfaces of PCBN cutting tool. Proper selection of the composition of the protective coating for a particular processing operation makes it possible to increase the efficiency of machining and wear-resistance of PCBN cutting-tools.

Keywords: cutting process, the cutting tool with PCBN, wear-resistant coatings, amorphous BN.

To the analysis of accuracy machining of the piston pin / A.P. Tarasyuk, N. Y. Lamnauer // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2015. – № 40(1149). – P. 11-1-30 – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-004X.

The problem of machine building, which concerns of the processing accuracy achieved. A new method for finding estimates of the model parameters of a random variable – size, proposed. This assessment can be used in the calculation formulas for the analysis of the accuracy of the processing technology. The research results to assess the quality of the machining process of the piston pin for VAZ used. Maximum percentage of quality of size for piston pin at the current processing technology was calculated. The size on which you need setting the machine defined. Application of the results of research will improve the quality of the piston pin.

Keywords: quality, accuracy, size, processing, analysis.

Temperature and thermal stresses under the action of ions to magnesium alloys and the possibility of obtaining nanostructures / G.I. Kostyuk, Behzad Razmdzhuyi, O.O Bruyaka // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2015. – № 40(1149). – P. 14-20 – Bibliogr.: 14. – ISSN 2079-004X.

The working investigated the temperature field, the irrate of rise and thermal stresses under the action of the ion B^+ , N^+ , C^+ , Al^+ , V^+ , Cr^+ , O^+ , Ni^+ , Zr^+ , Mo^+ , Hf^+ , W^+ , Ta^+ , Pt^+ of charge from one to three on the magnesium alloys. Since the range of the maximum temperature in the range from $1,82 \cdot 10^3$ to 3,9 K, and the rate of temperature change varies from 10^{14} to 10^{17} K / s. Investigation of the sevalues depending on the energy of ions and charge it possible to find the volume of material in the area where the realized sufficient temperature to form the nanostructures, butat the same time, the temperature does not lead to graing rowth that is produced ion flow process parameters that provide the nanostructures.

Keywords: temperature, rate of temperature rise, temperature stress, ions, magnesium alloys, charge, energy ions.

The influence of quantity of fill material on holes quality when drilling composite materials / G.L. Khavin, I.O. Esip // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2015. – № 40(1149). – P. 21-25 – Bibliogr.: 17. – ISSN 2079-004X.

The influence of quantity of fill material on holes roughness and delamination when drilling of multilayer composite materials are considered. The analysis of experimental and theoretical studies of delamination and roughness in the workpiece during drilling is represented. The mechanism of occurrence of such defects and the current state of the problem of predicting their quantitative characteristics is described. The influence of different technological parameters on the reduction in the amount of defects, including delamination factor is analyzed.

Keywords: drilling defects, layered composites, roughness during drilling.

The analysis characteristic of two-stage information-measuring system of coordinate setting parameters of diamond grinding / A.F. Enykeev, F.M. Evsukova, O.Iu. Prykhodko // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2015. – № 40(1149). – P. 26-31 – Bibliogr.: 3. – ISSN 2079-004X

It is offered of program motions of hardware systems to reduce time of processing time details and ensure the desired «quality class» of the surface smoothness. The development of architecture of information-measuring system is made on the basis of: methods of coordinate and digital control, the hierarchical principle, indirect measurements of roughness, and principles of decentralization and parallelization of processes of incoming information processing. It is built the mathematical models of interference of information-measuring system in a form of linear and harmonic linear stochastic processes. Devices of signal processing means are designed on the basis of minimizing of a quadratic quality criterion with using standard mathematical models of hardware means with a known delay. It is developed the application software and database, the schema of computer simulation of processes of transformation of information through data channels.

Keywords: hardware means, information-measuring system, indirect measurements, computer simulation.

The volume of the nanocluster and its depth under the action of ions of different energies, varieties and charges on the titanium alloy / G.I. Kostyuk , T.O. Postelnyk , O.M. Melkozorova // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2015. – № 40(1149). – P. 32-38. – Bibliogr.: 18. – ISSN 2079-004X.

Researches volume values nanocluster and its depth, depending on the energy, charge and the type of ions (B^+ , N^+ , C^+ , Al^+ , V^+ , Cr^+ , O^+ , Ni^+ , Zr^+ , Mo^+ , Hf^+ , W^+ , Ta^+ , Pt^+), which allows to determine the composition of the ions, their energy and charges for a desired nanostruktur layer, and with the required density of the ion current estimate virtually all process parameters required for the layer thickness and the physical and mechanical characteristics of the titanium alloy.

Keywords: volume nanocluster, ions, the depth, the ion current density, titanium alloy, nanostructures.

Simulation of shock deformation of plates hemispherical drummer / S.S. Dobrotvorsky, S.S.Gnuchih, L.G. Dobrovol'ska // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2015. – № 40(1149). – P. 39-42. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2079-004X.

Computer simulation of shock deformation process plates consisting of materials of different thicknesses, hemispherical drummer. The increased processing speed machine parts, protective design of machine tools need improving shock resistance, while reducing material consumption. Considered the problem of contact plate dynamic deformation at high speeds of the process. For high-speed deformation process took into account the dependence of physical and mechanical properties of the material level rate of deformation. Computer modeling process conducted specialized software package ANSYS in the module "Explicit Dynamics " based on the method kintsevyh- items at high speeds. Analysis of the data showed the benefits of multi-layer ceramic plates.

Keywords: mathematical modeling, finite element method, multilayer plate.

Conditions of high-performance grinding with an initial preload in the process system / F.V. Novikov, I.A. Ryabekov // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2015. – № 40(1149). – P. 43-46. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-004X.

Analytically describes the variation over time of the cutting force, the material removal rate and the size of the elastic movement occurring in the process system, when grinding with an initial preload in the process system. It has been shown that these parameters decline over time processing, providing the required performance accuracy and quality of machined surfaces. Theoretically, it found that the intensity of the changes of technological parameters of processing time considered the scheme exceeds the elastic grinding circuit grinding. This indicates the efficiency of its use in the final stage of the grinding operation under low stringency processing system to provide high levels of precision machining. Examples of effective practical use of the grinding circuit. Thus, when machining holes with a diameter of 6 - 10 mm, rings of high hard magnetic alloys ANKO YuNDK and 3A-18 (HRC 62-63) transition from the rigid to the grinding circuit grinding circuit with initial preload in the processing system will reduce the processing time over 1.5

Keywords: grinding, the technological system, the initial tightness, precision machining, cutting force, the elastic displacement allowance.

The productuon of nanostructures under the action of pulsed laser radiation on steel / G.I. Kostyuk, V.N. Pavlenko, Yu. V. Shirokiy // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2015. – № 40(1149). – P. 47-52 – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-004X.

We considered the problem of action the effects of ionizing radiation on materials.

We solved the problem of heat conduction and joint thermo-elasticity. For a low-carbon and high-carbon steels obtained temperature fields in the case of pulsed exposure to ionizing radiation. Estimated rate of rise of temperature. As a criterion for the formation of nanostructures were taken as follows:

– The presence of heat in the formation of nanostructures (500–1500 K);

– Ensuring the growth rate of temperature higher than 10^7 K/s;

– Small dimensions, in which the temperature exceeds the allowable 1500 for no more than 2 times 10^{-7} sec. with (a slight increase in grain as a result of high temperatures, but not sufficient to reach the values of phase transformations).

For steels 20, 40, 45, 40X, U8 and U12 are obtained depending on the maximum temperature in the spot at a depth of 1 micron, depending on the time, which made it possible to find a treatment method: heat flux density and time of the action in which is possible to obtain nanostructures for all the studied materials. The examples of construction of spatio-temporal patterns of temperature fields that allow you to estimate the size of the zone where possible to obtain nanostructures by heat flux densities from 10^{10} to $3 \cdot 10^{10}$ W/m² and running times with $3 \cdot 10^{-7}$. It is shown that reducing the heat flux to $10^8 - 3 \cdot 10^8$ W/m² and time of action with $3 \cdot 10^{-3}$ sec. Can achieve substantially the same temperatures, but in this case, as shown

in the experimental work Antropova can produce micro (1.3–2 microns) submicron structures (0.7–0.9 microns), which is associated with the fact that the growth rate of temperature is of the $\approx 10^6$ K/s, which does not allow its value to more than 10^7 K/s, which once again confirms the thesis of the need to meet these criteria.

In work zones nanostructures based heat flux on the time of its action, where there are restrictions on the maximum and minimum temperature, the rate of temperature rise and the possible destruction of the thermoelastic stresses.

All this allows you to find the technological parameters of pulsed laser radiation; heat flux and its duration when ensure the production of nanostructured layers.

Keywords: nanostructure, the laser radiation, steel.

Laws of formation of thermal process parameters for grinding / O. S. Klenov // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2015. – № 40(1149). – P. 53-56 – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-004X.

Analytical dependence for determining the temperature of the cutting, the depth of penetration of heat in the core and adiabatic heating time adiabatic rods, which presented a variety of removable allowance at flat grinding. It was found that over time, taking into account the processing of traffic along the adiabatic heat source rod at a constant speed, these parameters are increased, asymptotically approaching a certain constant values. At this time, the adiabatic heating rod less time of its contact with the grinding wheel, which involves reducing the temperature in the grinding of cutting as compared with the case where there is no movement of the adiabatic heat source along the rod. The calculation of the heat in the outgoing chip formed in the surface layer of the workpiece. It is found that with increasing temperature up to 1500 °C cutting adiabatic rod requires more heat than the chip formed and the temperature increases from 1500 to cut the maximum value - 2000 °C, conversely, more heat is generated in the chips out.

Keywords: grinding process, multipass grinding, cutting temperature, the thermal process, the adiabatic rod grinding depth.

Technological maintenance of accuracy and surface roughness of the processing of holes / F.V. Novikov, R.M. Minthev // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2015. – № 40(1149). – P. 57-60 – Bibliogr.: 4. – ISSN 2079-004X.

Reasonable terms to reduce the surface roughness of the hole through the use of internal grinding circuit with the location of the axis of rotation of the circle perpendicular to the axis of rotation of the hole. Calculations revealed that in this case, repeatedly increases the number of simultaneous abrasive grains participating in the formation of surface roughness, as compared with conventional internal grinding circuit - with the location of the axis of rotation parallel to the axis of rotation of the circle of the hole, which leads to a decrease in the surface roughness of the machined hole. Revealed regularities of processing errors hole at internal grinding and honing, due to the appearance in the technological system of elastic movements. Showing considerable technological capabilities honing holes in terms of improving the accuracy of processing is achieved by creating an elastic system in the construction of an abrasive tool - hone. The effectiveness of increasing the accuracy of the processing hole by using a flexible grinding wheel for internal grinding.

Keywords: Cutting a hole, abrasion, internal grinding, honing, hone, grinding mode, error handling, surface roughness.

Determination of the possibility of energy formation in grain receipt nanostructures in the case of existing ions of different varieties, charge and energy on structural materials / G.I. Kostyuk, A.V. Matveev, E.A. Volyak // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2015. – № 40(1149). – P.61-65. – Bibliogr.: 15. – ISSN 2079-004X.

The paper considers the possibility of estimating the energy requirements for crystallization, ie, the formation of the grain in the preparation of nanostructures in the case of actions of various kinds of ions, energy and charge. On the basis of quantum-mechanical approach, taking into account the Coulon repulsion of the ionic bond and found the energy of crystallization of the cluster. The number of particles in a cluster is calculated on the basis of joint decisions of the problem of heat conduction and thermoelasticity. It is shown that, by adopting the atomization energy equal to the energy of crystallization for light ions - this energy about energy ion current, whereas for heavy it is insignificant and can be ignored.

Keywords: energy crystallization, nanostructures, ions, nanocluster.

The productivity of magnetic-abrasive processing of end-cutting and axial tool on a rotary machines / V. Geichuk, V. Moseychuk // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2015. – № 40(1149). – P.66-72. – Bibliogr.: 20. – ISSN 2079-004X.

In the article the comparative analysis of productivity of magnetic-abrasive finishing on robotic machine tool with magnetic systems in the form of a "ring bath" of two types is given. First from them - magnetic system with a radial feeding and rotational polar tips on constant magnets, second - electromagnetic system with a face feeding and motionless polar tips. As a result of the researches it is defined, that the robotic machine tool which consists from a six-spindle rotor head and magnetic system of the second type possess the most productivity. Though magnitude of an auxiliary time is less in the robotic machine tool which consists of magnetic system of the first type and the singlex working block in a robot gripper. By the reserve of the heightening of productivity of machining is the rotor line on the basis of magnetic system with rotational polar tips and radial feeding. Preliminary studies illustrate, that the principal deficiencies of magnetic system with face feeding (in this case) is the coincidence of the motions of main cutting and transportation and also technical complexities of input-output of preforms into the ring bath.

Keywords: magnetic abrasive finishing, rotary machine, robot, tool axis, voltyak, productivity.

Aspects of adsorption dryers for compressed air plasma cutting equipment./ S.S. Dobrotvorsky, B.A. Aleksenko, L.G. Dobrovol'ska // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2015. – № 40(1149). – P.73-77. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2079-004X.

A practical experimental study of the influence of the quality of the compressed air used to form the plasma jet in the process of plasma cutting steel with an inactive gas. Due to the wide spread of technology of plasma cutting in modern industrial manufacturing technology is an indication that needs to be improved in order to improve product quality and reduce production costs of the enterprise. The results showed the need for adsorption dryers in the process of preparing for air plasma cutting machines.

Keywords: plasma cutting, dryer, compressed air, moisture, adsorption, regeneration.

Improving the accuracy of machine tools based on numerical calculations of stiffness ellipsoids / V.B. Strutynskyi, V.M. Chupryna, O.Ia. Yurchyshyn// Bulletin of NTU «KhPI». Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2015. – № 40(1149). – P.78-84. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-004X.

Based on the tensor-geometrical approach to describe the stiffness of major machine tool subsystems the spatial rigidity model of its elastic system was made. The algorithm to find the static stiffness (compliance) of machine tool in any direction in three dimensional space was developed and the surfaces of static rigidity were built.

Keywords: metal-cutting machine tool, elastic system, subsystem, stiffness, tensor, spatial model.

Deposition of qualitative even-thickness vacuum-arc coating to hard-alloy cutting tool at treatment of large production sets / O. O. Baranov, G. I. Kostyuk // Bulletin NTU «KhPI». Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2015. – № 40(1149). – P. 85-89. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-004X.

A scheme of technological setup to deposit qualitative even-thickness vacuum-arc coating to hard-alloy cutting tool at treatment of large production sets on the large substrates with diameter up to 400 mm is described. Control of the plasma fluxes from the vacuum-arc source is provided by a set of

the plasma traps generated on a way of propagation of the plasma flux, while a magnetron discharge is used for the ion cleaning and preliminary heating of the parts. The control magnetic fields are generated by a set of electromagnets installed under the substrate.

Key words: plasma-ion treatment, cutting tool, even-thickness coatings.

Using flow cavitation activators to improve the efficiency of coolant / A.V. Fesenko, V.D. Khytsan, N.P. Skydan // Bulletin NTU «KhPI». Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv. : NTU «KhPI», 2015. - № 40 (1149). – P. 90-95. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-004X.

The article provides a method for the activation of the coolant flow in the hydrodynamic devices, allowing to carry out intensive mixing and processing kvitantsionnyu emulsions, both at the stage of its prigotov-tion, and during recovery. The analysis of the processes taking place during the passage of the flow through the left-shte kvitantsionnye mixers and attachments. Designed stand for the experimental study of steam-flow meters at constant energy input. An experimental study of flow faucets and kvitantsionnyh baits on the basis of which the installation is designed for cylindrical grinding machines, providing the production of homogeneous and fine emulsion.

Keywords: grinder, mixer, activation, pressure, flow rate, Kavitation, the hydrodynamic effect of coolant.

Analysis of modern layouts transfer machines with rotary-drum unit / A.A. Permyakov, Yu.V. Timofeev, I.E. Yakovenko // Bulletin NTU «KhPI». Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv. : NTU «KhPI», 2015. - № 40 (1149). – P. 96-101. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-004X.

In industrialized countries, the basis of production of highly technological equipment produced by aggregate-modular. The creation of high-performance multi-position modular machines involved a number of leading machine-tool companies, promising layout some of them are discussed in this article. A review of modern multi-position rotary indexing machines with horizontal axis of the workpiece transport during processing. Considered specifications, technological capabilities and features of the layout.

Keywords: rotary transfer machine, machine layout, rotary-drum unit.

Technological maintenance of rolling friction and sliding friction in gear boxes / A. A. Klochko, M. I. Gasanov, E.V. Basova // Bulletin NTU «KhPI». Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv. : NTU «KhPI», 2015. - № 40 (1149). – P. 102-107. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-004X.

The article considers the conditions of contacting spur gear and technological methods vozdeystviya in the formation of the involute surfaces of the teeth at which the slippage of the teeth of one gear relative to the tooth profile of the mating wheels and of the force of friction-slip. Loss of energy to friction in gears comes to 10% of the total energy loss to overcome friction. From gears energy loss occurs in the teeth due to their friction with the discrepancy of the accuracy of manufacturing gears according to the norms of kinematic precision, smoothness of norms, standards lateral clearance according to the requirements GOST-81 and feature of the tribological contact of involute mating surfaces. It is shown that for strength calculations of cylindrical gear wheels is necessary to consider in addition to dynamic loading and effort of rolling friction-slip in gears. In toothed cylindrical gears rolling friction much less than sliding friction, therefore, one of revolyuysii scientific fields is to reduce and minimize the phase slip of the mating involute profiles of gear wheels taking into account the changes of parameters of surface layer condition of teeth: roughness, waviness, hardness, physical and mechanical properties of material of gear wheels.

Keywords: tribology, contact, gear, technological vozdeystvie, formoobrazovanie, rolling friction-slip.

Performance and reliability research unit assembly "hydraulic units" in a computer-aided manufacturing / O.M. Shelkovoy, M.S. Martynov, O.V. Naboka // Bulletin NTU «KhPI». Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv. : NTU «KhPI», 2015. - № 40 (1149). – P. 108-1012. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-004X.

The analysis of existing problems and methods to increase productivity assembly units. To wit forgiveness productivity and automation units assembling the mathematical model of IMI-mutation modeling manufacturing systems assembly units. Forecast to increase productivity glass of providing units to 20% using a mathematical model of simulation modeling of manufacturing systems.

Keywords: drawing nodes, increasing productivity, mathematical model, simulation modeling of manufacturing systems.

Study of structural transformations and their effect on the surface layer when the grinding / M. S. Stepanov, A. A. Klochko, O. A. Antsiferova // Bulletin NTU «KhPI». Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv. : NTU «KhPI», 2015. - № 40 (1149). – P. 113-1016. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-004X.

A fundamental factor of high durability hardened toothed wheels are an investigation of the stresses in the surface layer, is determined by the type and conditions of technological impact in the process of zabolevania. The influence of residual stresses on durability of gears depending on heat generated in the cutting zone and leads to the formation of tensile stresses, the change of hardness and structure. Cause structural stresses are volume changes in the cross section of the material caused by the transformation of austenite to smaller specific volume in the structure of the higher specific volume. Structural residual stresses in the surface layer of the toothed wheels with different schemes of zabolevaniya always appear in conjunction with thermal stress and causes the tensile stress, and at the core of compressive stress.

Keywords: soborovanie, the surface layer, technological exposure, tempered gear.

ЗМІСТ

<i>Костюк Г.И.</i> Получение нано- и субмикроструктур при действии лазерного излучения на рн из твердых сплавов.....	4
<i>Клименко С. Ан., Клименко С. А., Береснев В. М.</i> Зношування та стійкість різальних інструментів із пкнб з зносостійким покриттям на основі нітриду бору у аморфному стані.....	7
<i>Тарасюк А.П., Ламнауер Н. Ю.</i> До питання аналізу точності технологічного процесу обробки поршневого пальця.....	11
<i>Костюк Г.И., Размджуи Бехзад, Бруйка О.О.</i> Температуры и температурные напряжения при действии ионов на магниевые сплавы и возможность получения наноструктур.....	14
<i>Хавин Г.Л., Есип И.О.</i> Влияние количества наполнителя на качество отверстий при сверлении композитов.....	21
<i>Єнікєєв О.Ф., Євсюкова Ф.М., Приходько О.Ю.</i> Аналіз характеристик вохступінчастої інформаційно-вимірноювальної системи покоординатного задавання параметрів алмазного шліфування.....	26
<i>Костюк Г.И., Постельник Т.А., Мелкозерова О.М.</i> Объем нанокластера и глубины его залегания при действии ионов разных энергий, сортов и зарядов на титановый сплав вт-1.....	32
<i>Добротворский С.С., Гнучих С.С., Добровольская Л.Г.</i> Моделирование процесса ударного деформирования пластин полусферическим ударником.....	39
<i>Новиков Ф. В., Рябенков И. А.</i> Условия высокоэффективного шлифования с начальным натягом в технологической системе.....	43
<i>Костюк Г.И., Павленко В.Н., Широкий Ю.В.</i> Перспективы получения наноструктур при действии импульсного лазерного излучения на стали.....	47
<i>Кленов О.С.</i> Закономерности формирования параметров теплового процесса при шлифовании.....	53
<i>Новиков Ф. В., Минчев Р. М.</i> Технологическое обеспечение точности и шероховатости поверхности при обработке отверстия.....	57
<i>Костюк Г.И., Матвеев А.В., Воляк Е.А.</i> О возможности определения энергии образования зерна при получении наноструктур в случае действия ионов различных сортов, зарядов и энергий на конструкционные материалы.....	61
<i>Гейчук В. Н., Мосейчук В. А.</i> Производительность магнитно-абразивной обработки концевой и осевой инструмента на роторных станках.....	66
<i>Добротворский С.С., Алексенко Б.А., Добровольская Л.Г.</i> Получение нано- и субмикроструктур при действии лазерного излучения на рн из твердых сплавов.....	73
<i>Струтинський В.Б., Чуприна В.М., Юрчишин О.Я.</i> Підвищення точності металорізальних верстатів на основі чисельних розрахунків еліпсоїдів жорсткості.....	78
<i>Баранов О.О., Костюк Г.И.</i> Осаждение качественного равнотолщинного вакуумно-дугового покрытия на твердосплавный режущий инструмент при обработке больших партий.....	85
<i>Фесенко А.В., Хицан В.Д., Скидан Н.П.</i> Использование проточных кавитационных активаторов для повышения эффективности СОЖ.....	90
<i>Пермяков А.А., Тимофеев Ю.В., Яковенко И.Э.</i> Анализ компоновок современных агрегатных станков с поворотнo-делительным барабаном.....	96
<i>Клочко А.А., Гасанов М.И., Басова Е.В.</i> Технологическое обеспечение трения качения и трения скольжения в зубчатых передачах.....	102
<i>Шелковий О.М., Мартинов М.С., Набока О.В.</i> Дослідження продуктивності і надійності складання вузла «гідроагрегат» в умовах автоматизованого виробництва.....	108
<i>Степанов М.С., Клочко А.А., Анцыферова О.А.</i> Исследование структурных превращений и их влияние на поверхностный слой при зубошлифовании.....	113
Реферати	117
Рефераты	120
Abstracts	123

CONTENTS

Kostyuk G.I. Getting nano- and submicrostructure under the action of laser radiation on the RI Carbide.....	4
Klimenko S.An, Klimenko S.A, Beryesnev V.M. Wear and ctiykist cutting tools with PKNB of wear-resistant coatings based on boron nitride in the amorphous state.....	7
Tarasyuk A.P., Lamnauer N. Y. To the analysis of accuracy machining of the piston pin.....	11
Kostyuk G.I., Razmdzhuyi Behzad, Bruyaka O.O Temperature and thermal stresses under the action of ions to magnesium alloys and the possibility of obtaining nanostructures.....	14
Khavin G.L., Esip I.O. The influense of quantity of fill material on holes quality when drilling composite materials...21	21
Enykeev A.F., Evsiukova F.M., Prykhodko O.Iu. The analysis characteristic of two-stage information-measuring system of coordinate setting parameters of diamond grinding.....	26
Kostyuk G.I., Postelnyk T.O., Melkozorova O.M. The volume of the nanocluster and its depth under the action of ions of different energies, varieties and charges on the titanium alloy.....	32
Dobrotvorsky S.S., Gnuchih S.S., Dobrovolska L.G. Simulation of shock deformation of plates hemispherical drummer.....	39
Novikov F.V., Ryabekov I.A. Conditions of high-performance grinding with an initial preload in the process system.....	43
Kostyuk G.I., Pavlenko V.N., Shirokiy Yu. V. The productuon of nanostructures under the action of pulsed laser radiation on steel.....	47
Klenov O. S. Laws of formation of thermal process parameters for grinding.....	53
Novikov F.V., Minthev R.M. Technological maintenance of accuracy and surface roughness of the processing of holes.....	57
Kostyuk G.I., Matveev A.V., Volyak E.A. Determination of the possibility of energy formation in grain receipt nanostructures in the case of existing ions of different varieties, charge and energy on structural materials.....	61
Geichuk V., Moseychuk V. The productivity of magnetic-abrasive processing of end-cutting and axial tool on a rotary machines.....	66
Dobrotvorsky S.S., Aleksenko B.A., Dobrovolska L.G. Aspects of adsorption dryers for compressed air plasma cutting equipment.....	73
Strutynskiy V.B., Chupryna V.M., Yurchyshyn O.Ia. Improving the accuracy of machine tools based on numerical calculations of stiffness ellipsoids.....	78
Baranov O. O. , Kostyuk G. I. Deposition of qualitative even-thickness vacuum-arc coating to hard-alloy cutting tool at treatment of large production sets.....	85
Fesenko A.V., Khytsan V.D., Skydan N.P. Using flow cavitation activators to improve the efficiency of coolant.....	90
Permyakov A.A., Timofeev Yu.V., Yakovenko I.E. Analysis of modern layouts transfer machines with rotary-drum unit.....	96
Klochko A. A., Gasanov M. I., Basova E.V. Technological maintenance of rolling friction and sliding friction in gear boxes.....	102
Shelkovoy O.M., Martynov M.S., Naboka O.V. Performance and reliability research unit assembly «hydraulic units» in a computer-aided manufacturing.....	108
Stepanov M. S., Klochko A. A., Antsiferova O. A. Study of structural transformations and their effect on the surface layer when the grinding.....	113
Abstracts	117

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХП»**

Збірник наукових праць

Серія:
Технології в машинобудуванні

№ 40 (1149) 2015

Наукові редактори д-р техн. наук, проф. Ю.В. Тимофієв,
д-р техн. наук, проф. О.О. Клочко
Технічний редактор канд. техн. наук, доц. Є.В. Басова

Відповідальний за випуск канд. техн. наук І.Б. Обухова

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ «ХП».
Кафедра технології машинобудування та металорізальних верстатів.
Тел.: (057) 707-66-25; e-mail: vestms@lenta.ru.

Обл.-вид № 57–15.

Підп. до друку 28.12.2015 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний.
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 8,0. Облік.-вид. арк. 10.
Тираж 300 пр. Зам. № 3033. Ціна договірна.

Видавець і виготовлювач
Видавничий центр НТУ «ХП». Свідоцтво про державну реєстрацію суб'єкта видавничої справи
ДК № 3657 від 24.12.2009 р.
61002, Харків, вил Фрунзе, 21

Надруковано в друкарні ФО-П Дуюнова Т.В.
Свідоцтво про державну реєстрацію № 2475418720 від 19.11.2014 р.
61023, Харків, вул. Веснына, 12.
тел. +38 (057) 717-28-80, e-mail: promart_order@ukr.net