

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

ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХПІ»

*Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки
матеріалів у машинобудуванні та металургії*

№ 5 (1048) 2014

Збірник наукових праць

Видання засновано у 1961 році

Харків
НТУ «ХПІ» 2014

Вісник Національного технічного університету «ХПІ»

Збірник наукових праць. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048)– 198 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 постановою президії ВАК «України від 26 травня 2010 р. №1 – 05/4. (Бюлетень ВАК України №6, 2010 р. стор. 3 № 20)

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, чл. -кор. НАНУ, д-р техн. наук, проф.; 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. Єпіфанов, канд. техн. наук, проф.; Ю. І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.; П. О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.; С. І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.; В. М. Кошельник, 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. Николаєнко, 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.; М. А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.; Ю. В. Тимофєєв, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:

Відповідальний редактор: А. П. Марченко, д-р техн. наук, проф.

Заступник відповідального редактора: Ю. О. Плєснецов, канд. техн. наук, ст.н.с.

Відповідальний секретар: В. М. Левченко, канд. тех. наук, доц.

Члени редколегії: І. С. Алієв, д-р техн. наук, проф., Г. А. Баглюк, д-р техн. наук, проф.; Бар Рюдигер, д-р техн. наук, проф.; О. М. Головка, д-р техн. наук, проф.; В. В. Драгобецький, д-р техн. наук, проф.; В. О. Євстратов, д-р техн. наук, проф.; В. С. Єршов, д-р техн. наук, проф.; В. Л. Калюжний, д-р техн. наук, проф.; В. К. Лобанов, д-р техн. наук, проф.; М. Є. Тараненко, д-р техн. наук, проф.; Є. М. Смирнов, д-р техн. наук, проф.; Г. М. Сучков, д-р техн. наук, проф.; В. А. Тітов, д-р техн. наук, проф.; О. І. Тришевський, д-р техн. наук, проф.; С. В. Федоров, д-р техн. наук, проф.; Є. А. Фролов, д-р техн. наук, проф.; В. Хомберг, д-р техн. наук, проф.; В. В. Чигиринський, д-р техн. наук, проф.

У квітні 2013 р. Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія «Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії», включений у довідник періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

Рекомендовано до друку вченою радою НТУ «ХПІ»

Протокол № 6 від 27 червня 2014 р.

© Національний технічний університет «ХПІ», 2014

УДК 681.586.621.37:543.275.1

В. Н. ГОРОБЕЦ, кан. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, Харьков;
А. Л. КОВОРТНЫЙ, мл. науч. сотр., Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, Харьков;
Ю. В. ГОНЧАРЕНКО, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, Харьков;
Ф. В. КИВВА, докт. физ.-мат. наук, зав. отделом, Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, Харьков;
С. М. ЗОТОВ, научный сотрудник, Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, Харьков;
М. И. ГОЛОВКО, старший инженер, Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, Харьков;
А. А. СЕВЕНКО, ведущий инженер, Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, Харьков;
Р. П. КОЛКОВ, директор, ООО"КБ ТИТАН", Харьков.

МИКРОВОЛНОВОЙ ДАТЧИК УРОВНЯ БЕТОННОЙ СМЕСИ

Датчиков уровня с различными функциями для различных материалов, уровень которых необходимо измерять и контролировать существует значительное количество. В работе представлен датчик для сигнализации предельных значений уровня бетонной смеси, который может быть использован в загрузочных бункерах технологических линий по изготовлению бетонных изделий, а также использован как измеритель влажности. Он обладает улучшенными показателями, такими как чувствительность, точность, механическая прочность по сравнению с другими датчиками, используемыми в аналогичных технологических процессах.

Ключевые слова: сигнализатор уровня, бетонная смесь, микроволны, резонанс.

Введение. Измерение уровня жидкостей и сыпучих материалов играет важную роль при автоматизации многих технологических процессов. В зависимости от условий измерения и характера контролируемой среды используются различные методы измерения уровня. Если нет необходимости в дистанционной передаче показаний, то уровень можно измерять датчиком уровня с визуальным отсчетом (указательные стекла). При необходимости дистанционного измерения уровня применяются более сложные датчики: гидростатические, буйковые и поплавковые, емкостные, индуктивные, радиоизотопные, волновые, акустические, термокондуктометрические. Разнообразие принципов действия и конструктивных исполнений датчиков

уровня обусловлено спецификой их использования для измерения уровня различных материалов – сыпучих материалов и жидкостей [1].

Если задача измерения уровня жидкости достаточно хорошо изучена, то проблема измерения уровня сыпучих материалов является более сложной. Имеется ряд обстоятельств, усложняющих задачу измерения уровня сыпучих материалов по сравнению с измерением уровня жидкостей. В первую очередь это связано с тем, что поверхность сыпучего материала расположена к горизонтали под углом естественного откоса, причем этот угол при заполнении или опорожнении емкости может быть различным.

Отрицательными качествами сыпучих материалов являются способность к налипанию и абразивное воздействие, что приводит к потере чувствительности и повышенному износу датчиков приборов контроля уровня [2].

Кроме того неоднородность веществ в объеме влияет на физические свойства материала, что усложняет применение методов измерения уровня, использующих определенные физические свойства.

По физическому состоянию бетонная смесь занимает особое, промежуточное положение между жидкостями и твердыми веществами. Она обладает определенной текучестью, в то же время ей присущи свойства сыпучих материалов – неоднородность, абразивность и способность к прилипанию.

По своему назначению датчики уровня делятся на сигнализаторы и уровнемеры.

Часто по условиям технологического процесса нет необходимости в измерении текущего уровня по всей высоте аппарата (бункера). В таких случаях применяют сигнализаторы уровня, в которых выходной сигнал возникает при достижении уровнем верхнего или нижнего предельных значений.

На сегодняшний день датчиков уровня существует огромное множество с различными функциями для различных материалов, уровень которых необходимо измерять и контролировать. Самое существенное отличие разных уровнемеров – это технологии и принципы их работы.

Большое разнообразие методов и принципов измерения уровня веществ, от которых зависит применение приборов, качество их работы, стоимость и доступность, обусловлены сложностью этого процесса. В первую очередь это касается сыпучих и вязких веществ. Поэтому выбор того или иного датчика для каждого конкретного случая является практически основным фактором, определяющим работоспособность и качество всей системы контроля уровня [3].

Целью настоящей работы является разработка датчика (сигнализатора) уровня бетонной смеси в загрузочных бункерах технологических линий по изготовлению бетонных изделий, который обладал бы улучшенными показателями, такими как чувствительность, точность, механическая прочность по сравнению с другими датчиками, используемыми в аналогичных технологических процессах.

Технологические условия, которые необходимо учитывать при разработке датчика уровня бетонной смеси. Как было сказано выше, при разработке датчика уровня необходимо учитывать требования, предъявляемые к нему техническими условиями применения в конкретном технологическом процессе. В первую очередь необходимо учитывать физико-механические свойства контролируемого вещества: состав, плотность и объёмная масса, липкость, абразивность, угол откоса свободной поверхности при насыпании и обрушении, влажность и т.д. [2]. Большое значение для разрабатываемого датчика имеет характер истечения и загрузки вещества в ёмкость и её конструкция.

Примером технологического процесса, где может быть использован разрабатываемый датчик, является линия для производства мелкоштучных бетонных изделий Titan 900-120 DNEХ.

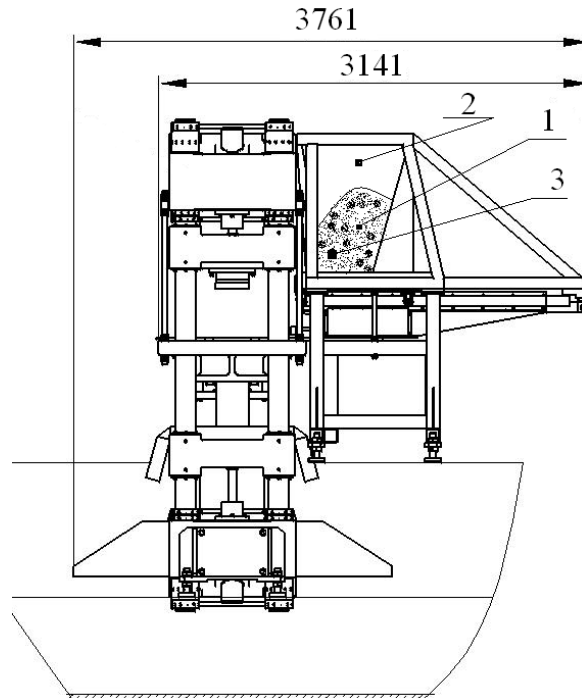


Рис. 1 – Гидравлический пресс Titan 900-120 DNEХ.
1 – бетонная смесь, 2, 3 – сигнализаторы уровня, 4 – загрузочный бункер.

На рис. 1 показана конструкция (в разрезе) бункера загрузки и дозировки бетонной смеси. Как видно из рисунка, трудности, возникающие при контроле уровня смеси следующие:

- угол откоса, образующийся при загрузке бункера, не позволяет использовать датчики с дистанционным измерением уровня (бесконтактные: ультразвуковые, акустические, микроволновые);
- абразивные свойства, а также большое давление потока загружаемой смеси на чувствительные элементы затрудняет использование емкостных, вибрационных, ротационных и других датчиков, в которых чувствительный элемент датчика должен находиться в потоке контролируемого вещества.

Для исключения этих недостатков в разрабатываемом датчике были предприняты следующие шаги:

- в качестве защитного материала для чувствительного элемента используется высокопрочная керамика;
- использование микроволн (400 – 800 МГц) с глубиной проникновения электромагнитного поля в смесь до 70-80 мм исключает влияние небольшого налипания смеси (20-30 мм) на работу датчика;
- датчики устанавливаются в таких местах (2 и 3, на рис.1), где наличие или отсутствие вещества адекватно отражает состояние контролируемого объема;
- установка датчика на вертикальную стенку бункера также уменьшает вероятность налипания смеси и повреждения керамической защиты датчика.

Физические предпосылки, используемые для реализации разрабатываемого датчика (сигнализатора) уровня. Сущность метода, используемого для реализации предлагаемого датчика уровня, заключается в измерении резонансных свойств высокочастотного (ВЧ) резонатора при попадании вещества (бетонной смеси) в поле резонатора. Широкое распространение резонансный метод получил при измерении параметров жидких веществ, где жидкость может полностью или частично заполнять внутренний объем резонатора [4,5]. В отличие от жидкости вязкое вещество (бетонная смесь) не обладает достаточной текучестью для заполнения объемного резонатора. При использовании резонансного метода для вязких веществ целесообразно применять открытые резонаторы, для которых характерно наличие не только внутреннего, но и внешнего полей.

Существует множество методов измерения параметров веществ, находящихся в электромагнитном поле резонатора. В зависимости от конструкции резонатора и характера размещения вещества в его электромагнитном поле имеет место соответствующая функциональная связь добротности Q с электрофизическими параметрами контролируемого вещества.

На рис. 2 показаны графики зависимости $U(f)$ для резонатора, соответственно, при отсутствии (этому случаю соответствуют резонансная частота f_1 и добротность Q_1 резонатора) и при размещении в его электромагнитном поле контролируемого вещества (Q_2, f_2).

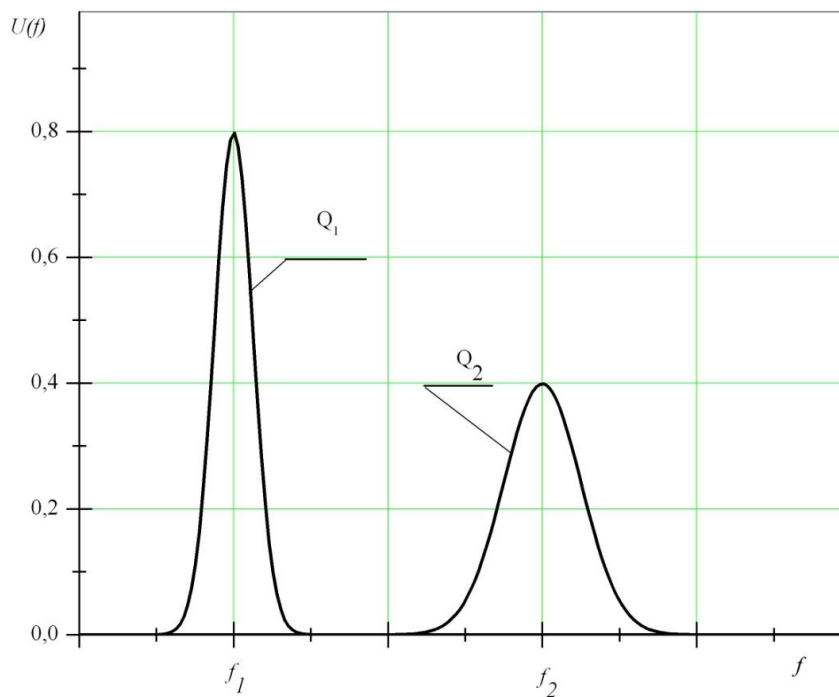


Рис. 2 – Зависимость напряжения на резонаторе для воздуха (Q_1, f_1) и контролируемого вещества (Q_2, f_2)

Измерение частоты смещения и амплитуды максимума резонансной кривой, а также её ширины на уровне половинной мощности позволяют судить не только о присутствии или отсутствии исследуемого вещества, но и об его физических свойствах, в частности, влажности.

Структурная схема и принцип работы сигнализатора уровня.
Структурная схема устройства, реализующего предлагаемый метод, приведена на рис. 3.

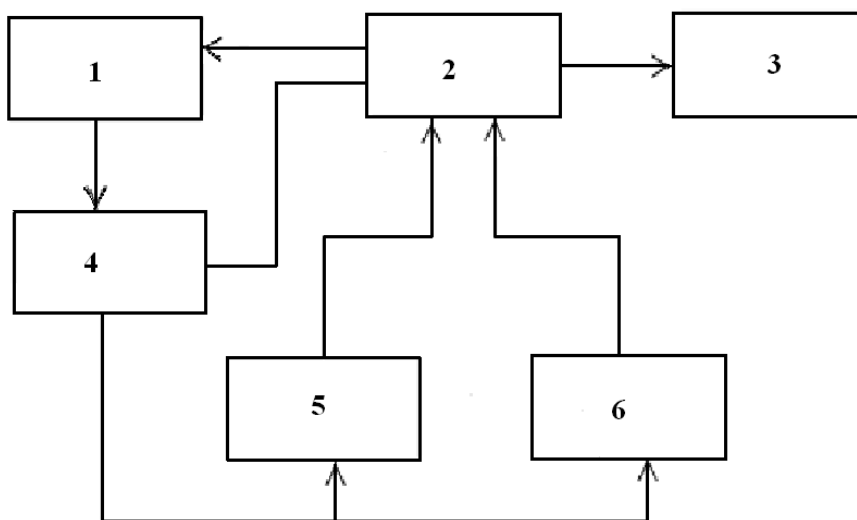


Рис. 3 – Структурная схема датчика уровня:

1 – синтезатор частоты, 2 – вычислительное устройство, 3 – индикатор, 4 – устройство АРУ, 5 – измерительный канал, 6 – опорный канал.

Устройство состоит из синтезатора частоты (1), управляемого вычислительным устройством (2), измерительного (5) и опорного (6) каналов, устройства АРУ (4) и индикатора (3).

Принцип работы устройства иллюстрируется на рис. 2. На первом этапе производится калибровка устройства по воздуху (кривая $Q1$, вещество в поле резонатора отсутствует). Генератор (1) вырабатывает сетку частот с шагом Δf . В качестве генератора, представляющего собой синтезатор частоты, может быть использована микросхема типа AD9833. Достоинством этой микросхемы является малое энергопотребление, низкая стоимость и возможность цифрового управления (для генерации синусоидального сигнала требуется только тактовый сигнал). Управление генератором осуществляется с помощью вычислительного устройства. В качестве вычислительного устройства можно использовать микроконтроллер семейства STM8. Микроконтроллер STM8S003F3P6 является дешевым, но при этом достаточно надежным и устойчивым компонентом, обладающим всеми необходимыми электрическими параметрами. Микроконтроллер управляет как генератором, так и устройством АРУ, которое представляет собой регулируемый аттенюатор (например – VAR64-05E6327). Сигналы, частотой f с шагом Δf , через устройство АРУ

поступают в измерительный и опорный каналы и, затем, в вычислительное устройство. В вычислительном устройстве производится сравнение измерительного и опорного сигналов для управления устройством АРУ и вычисление параметров измерительного сигнала ($f_1, U_1(f)$ на рис. 3). Измерительный канал (рис. 4) состоит из резонатора (L_p, C_p), детектора (Д2, тип – ВАТ15-03W) и усилителя (У2, тип – LM2904DR). Опорный канал предназначен для компенсации нелинейности генератора и отличается от измерительного канала тем, что вместо резонатора в нём используется сопротивление (R_A), эквивалентное волновому сопротивлению контура.

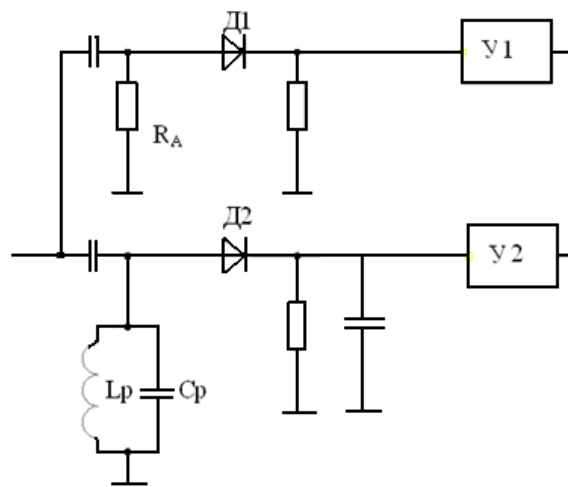


Рис. 4 – Измерительный и опорный каналы датчика уровня

При появлении вещества (бетонной смеси) в поле резонатора происходит смещение частоты резонанса (f_2) и изменение величины добротности (Q_2). После сравнения этих параметров с калибровочными в вычислительном устройстве вырабатывается сигнал о наличии или отсутствии вещества, который дальше поступает на индикатор.

Одним из достоинств датчика, кроме перечисленных ранее, является его многофункциональность. При соответствующей программной доработке, с помощью датчика можно определять некоторые физические параметры, например, влажность, которая является важным параметром в технологическом процессе изготовления бетонных изделий. Известно, что f и Q резонатора зависят от диэлектрической проницаемости вещества, которое полностью или частично заполняет объем резонатора. Диэлектрическая проницаемость в свою очередь зависит от влажности этого вещества. Таким образом, измеряя f и Q резонатора можно судить о влажности контролируемого вещества. Но

диелектрическая проницаемость зависит не только от влажности, но и от физико-химических свойств вещества. Этот недостаток достаточно легко можно исключить путём предварительной калибровки датчика по сухому (обезвоженному) веществу.

Выводы. Таким образом, разработанный датчик сигнализации предельных значений уровня бетонной смеси обладает улучшенными показателями, такими как чувствительность, точность, механическая прочность по сравнению с другими датчиками, используемыми в аналогичных технологических процессах. Кроме того, при соответствующей доработке он может быть использован как измеритель влажности, что даёт ему дополнительные преимущества в технологических процессах изготовления бетонных изделий.

Список литературы: 1. Датчики уровня сыпучих материалов. Сайт: РусАвтоматизация http://rusautomation.ru/sypuchie_materialy (дата доступа 27.03.14). 2. Дмитренко, Л. П. Приборы контроля и регулирования уровня сыпучих материалов / Л. П. Дмитренко // М., Энергия. – 1978. – 96с. 3. Смирнов, В. В. Система автоматического контроля уровня заполнения цементного бункера бетоносмесительного узла / В.В.Смирнов// Фундаментальные исследования.- 2013. – №6. – с. 1094-1097. 4. Брандт, А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах / А.А. Брандт // М., Физматгиз. – 1963. – 144с. 5. Еришов, А. М. Радиоволновый резонаторный метод измерения физических свойств жидкостей с диэлектрическими потерями / А.М. Еришов, А.А. Маслов, А.С. Совлуков, В.Я. Фатеев, В.В. Яценко.// Вестник МГТУ. – 2008. – т. 11. – №3. – с. 498-501.

Поступила в редколлегию 15.05.2014

УДК 621.73

В. О. ЄВСТРАТОВ, докт. техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»;
В. М. ЛЕВЧЕНКО, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ»;
Я. В. КУТЕЦЬКИЙ, інженер, НТУ «ХПІ».

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕМАТИКИ ПРОЦЕСІВ ВИТЯГУВАННЯ І КЛАСИФІКАЦІЯ ЗАГОТОВАНОК

У статті наведені результати експериментального дослідження процесу витягування вісесиметричних деталей з пласкої заготовки. Описані оригінальні способи виявлення особливостей деформації заготовок трьох різних розмірів: «великої», «середньої» та «малої». Експериментальні дослідження підтвердили, що три схеми деформації, зазначені авторами в раніше опублікованих роботах, дійсно мають місце. Отримані експериментальні дані дозволяють обґрунтувати більш досконалу математичну модель процесу витягування і підійти до створення підсистеми САПР розроблення процесів витягування і конструювання робочого інструмента.

Ключові слова: витягування, пуансон, матриця, деформація, коефіцієнт витягування.

Вступ. Не дивлячись на те, що процес витягування досліджено достатньо детально, залишається ще багато питань, які або не висвітлені в науково-

технічній літературі, або в різних джерелах трактуються по-різному. Одне з таких питань – особливості першого витягування пласкої заготовки.

Аналіз проблеми. В роботі [1] детально описано кінематику процесу витягування. Але, на жаль, в ній не розкрито сутність процесу так, як це зроблено, наприклад, в роботі [2]. В.П. Романовський наводить рисунок ([2], с. 83, фіг. 54) та коментар, з яких зрозуміла сутність процесу витягування.

З цієї схеми витікає, що (умовно) процес витягування полягає в тому, що трикутні сектори a в процесі витягування під дією напружень σ_θ стискаються і за рахунок пластичної деформації перетворюються у стінку стакану. Звичайно, дійсний процес значно складніший, але схему, що наведена на рис. 1, можна прийняти як перше наближення. З цієї схеми витікає, що із збільшенням ширини фланцю $h_0 = 0,5 \cdot (D - d)$ напруження σ_r може зростати настільки, що наблизиться до напруження плин σ_s на крайці матриці, а це спричинить до розриву металу заготовки.

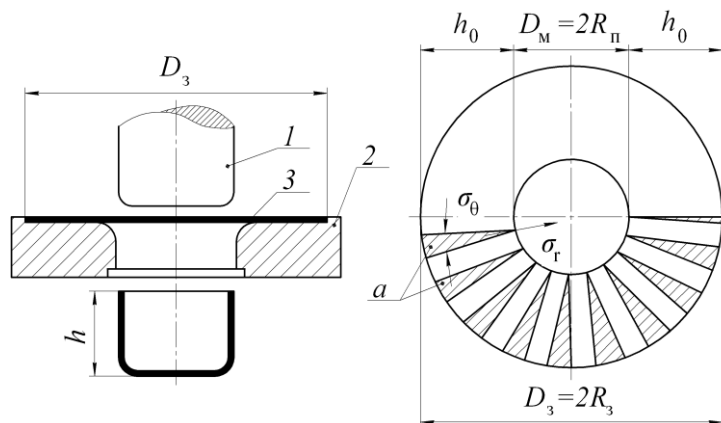


Рис. 1 – Схема витягування циліндричного стакану ([2], с.83, фіг. 54):
1 – пуансон, 2 – матриця, 3 – заготовка

В опублікованих раніше роботах авторів [3, 4] показано, що процес витягування може здійснюватися за трьома схемами.

Схема 1. Реалізується тоді, коли розмір вихідної заготовки R_3 перевищує гранично допустиме для витягування значення R_m/m . При цьому фланець залишається недеформованим на протязі усього процесу і $R_\phi = R_3$ (рис. 2, a), а формозміна деталі відбувається лише за рахунок потоншення кільцевої частини заготовки, яка знаходиться між тороподібними поверхнями пуансона і границею осередку деформації R_{max} : $(R_n - r_n) \leq r \leq R_m + r_m + \Delta$. Глибина деталі h (див. рис. 1) незначна (вона залежить від пластичності

заготованки), а потоншення кільцевої частини – значне. Процес завершується розривом стінки деталі на радіусному переході пуансона r_{Π} .

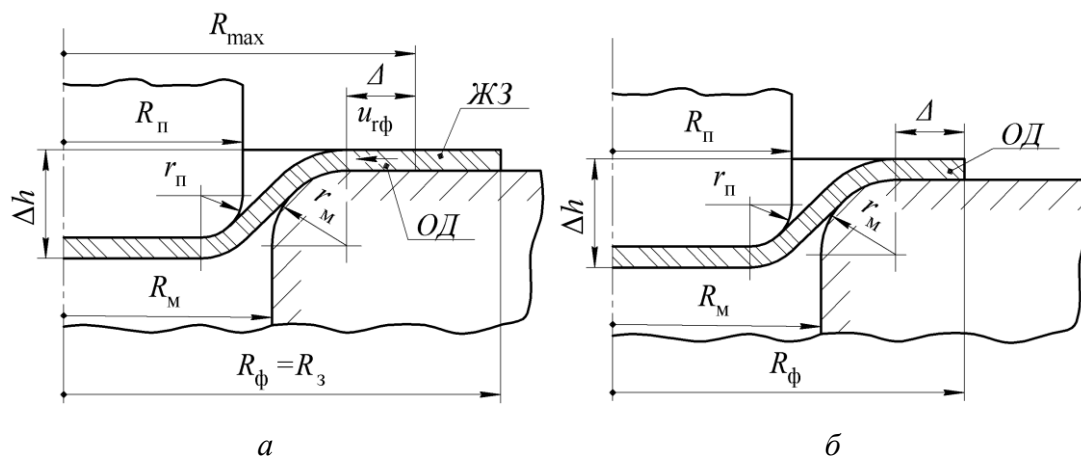


Рис. 2 – Схеми витягування вісесиметричних заготовок: *а* – «великої»; *б* – «малої»

Схема 2. За характером деформації її можна вважати протилежною схемі 1. Головна її особливість полягає в тому, що уся фланцева частина заготованки $(R_n - r_n) \leq r \leq R_{\phi}$ починає втягуватись у матрицю з самого початку витягування (рис. 2, б). Глибина частини, яка витягнена, може бути достатньо великою. Вона визначається мінімальним коефіцієнтом витягування m . Розриви стінки виключаються (якщо попереджено утворення глибоких гофрів). Процес не супроводжується потоншенням, навпаки, при втягуванні фланця у проміжок між матрицею і пуансоном відбувається відчутне потовщення стінки.

Зазначені схеми є крайніми випадками витягування. Але є ще проміжна між цими схемами – **схема 3**. Головна її особливість полягає в тому, що з початку витягування фланцева частина заготованки $(r \geq R_m + r_m + \Delta)$ залишається недеформованою, а кільцева $(R_n - r_n) \leq r \leq (R_m + r_m + \Delta)$ втягується у матрицю. У зв'язку із деформацією кільцевої частини заготованки і значним її зміцненням, збільшенням її несучої здатності, осередок деформації розширюється, охоплює усю периферійну частину заготованки, і увесь фланець поступово втягується у матрицю.

З метою скорочення наступних пояснень, домовимось називати заготованки, які деформуються за схемами 1, 2 і 3 відповідно «великими», «малими» і «середніми».

Результати дослідження. Якщо радіуси пуансона і матриці r_{Π} та r_m брати у відповідності із рекомендаціями [1, 2], то приблизні кількісні співвідношення

між «розмірами» заготованок і розмірами інструмента можна визначити досить наочно на числовій осі (рис. 3).

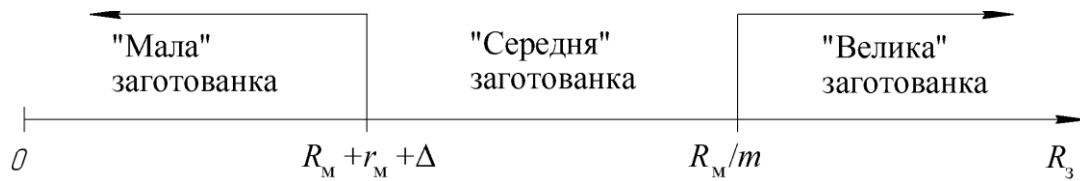


Рис. 3 – Класифікація заготованок за розміром

Тут через m позначений мінімальний коефіцієнт витягування: $m = D_{ц}/D_{з \max}$; через Δ – деякий розмір, що залежить від умов деформації (особливо від тертя). Він може бути визначений на підставі експериментальних досліджень. Решта позначень показані на рис. 1.

Для проведення експериментальних досліджень розроблено стенд (рис. 4).

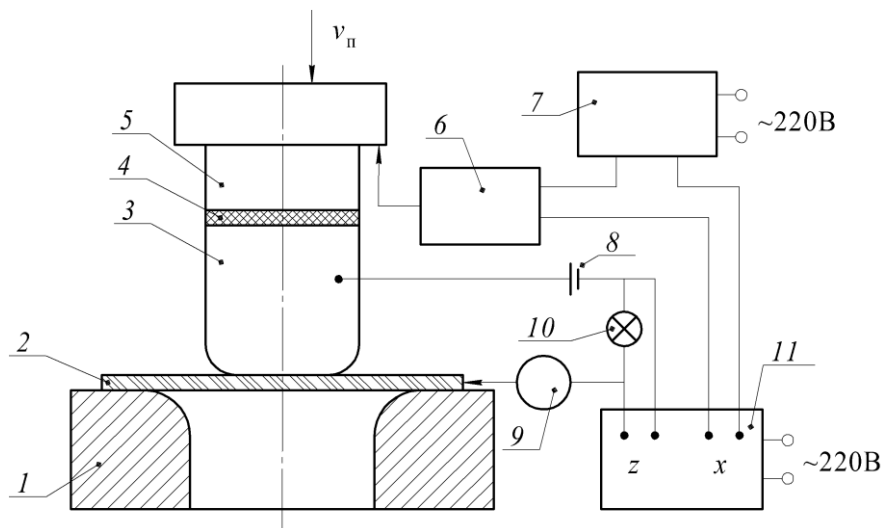


Рис. 4 – Принципова електрична схема дослідного стенда:

- 1 – матриця; 2 – заготованка; 3 – пуансон; 4 – електроізолююча переліжка;
5 – пуансонотримач; 6 – хронограф; 7 – блок живлення Б5-49; 8 – джерело живлення;
9 – відмітчик переміщень; 10 – сигнальна лампочка; 11 – самописець Н307

Оригінальність цього стенда полягає в тому, що він передбачає можливість точно фіксувати два важливих моменту деформації: 1) початок процесу витягування (коли пуансон дотикається заготованки) та 2) коли починається радіальна течія фланця заготованки.

Як видно зі схеми, в процесі наближення пуансона до заготованки ланцюг, що включає елементи 2, 3, 8, 10 і 9, не замкнена. В цей час лампочка не

горить, на самописець живлення не подається. Як тільки пуансон 3 дотикнеться до заготованки 2, ланцюг замикається, лампочка загоряється, а на клемі з відмітчика переміщень від джерела живлення 8 подається напруга U яка фіксується на стрічці самописця Н307. Якщо витягується «велика» заготованка, то деформація не охоплює периферійну частину заготованки, її радіус R_{ϕ} залишається незмінним – він дорівнює радіусу вихідної заготованки R_3 . Ланцюг відмітчика переміщень залишається у замкненому стані, що й фіксується самописцем.

Якщо ж витягується «мала» заготованка, то зразу після дотикання пуансона і заготованки деформація охоплює весь фланець – він втягується у матрицю, його радіус R_{ϕ} зменшується, ланцюг відмітчика переміщень розмикається, напруження U змінюється, що також фіксується самописцем.

Якщо ж витягується «середня» заготованка, то спочатку деформація не охоплює периферійну частину фланця, ланцюг відмітчика переміщень залишається у замкненому стані і лише після того, як осередок деформації розповсюдиться на увесь фланець, ланцюг відмітчика переміщень розмикається.

Щоб підвищити точність фіксації моменту початку радіального переміщення фланця, у схемі передбачено три контакти в ланцюгу відмітчика переміщень. Вони розташовані під кутом 120° один відносно одного і з'єднані паралельно. Це дозволяє зкомпенсувати похибки центрування заготованки відносно матриці.

Схема дослідного стенду забезпечує можливість того, що ходограф 6 і блок живлення 7 подають на самописець сигнал, який перетворюється у пропорційне переміщення стрічки самописця, а сигнал від джерела живлення 8 перетворюється у відхилення пера самописця. Таким чином, на стрічці (яку домовимось називати ходограмою) по осі X (поздовжній осі) самописець фіксує переміщення пуансона, а по осі Z – сигнал відмітчика переміщень.

Для розшифрування ходограм здійснювали попереднє градуювання вимірального тракту і встановили, що одному міліметру переміщення пуансона Δh відповідає 5 міліметрів переміщення стрічки. Це дозволило для кожної ходограми розмітити вісь X безпосередньо у міліметрах ходу пуансона Δh .

Градуювання ходограми по осі Z не потрібне, оскільки переміщення пера самописця відбувається тільки у момент відриву фланця від будь-якого з контактів відмітчика переміщень.

На рис. 5 показані три типові ходограми процесу витягування заготованок різних розмірів. На кожній з них чітко визначений хід наближення пуансона (Δh_n), ідентифікується момент дотикання пуансона до заготованки (мітка M_1), коли ланцюг, що містить елементи 2, 3, 8, 10 і 9, замикається; Δh_1 – момент початку радіальної деформації фланця (розрив ланцюга відмітчика переміщень 9; Δh_m , Δh_c , і Δh_b – переміщення пуансона при витягуванні «малої», «середньої» та «великої» заготованки відповідно.

На ходограмах витягування «малої» та «середньої» заготованок також дуже чітко ідентифікується момент розриву ланцюга у зв'язку з початком деформування фланця. На ходограмі витягування «великої» заготованки показано момент розриву стінки заготованки, який визначений по різкому падінню зусилля деформації (дослідний стенд не передбачав окремого запису на ходограмі зусилля деформації).

Таким чином, реальність усіх трьох згаданих вище схем знайшла переконливе підтвердження.

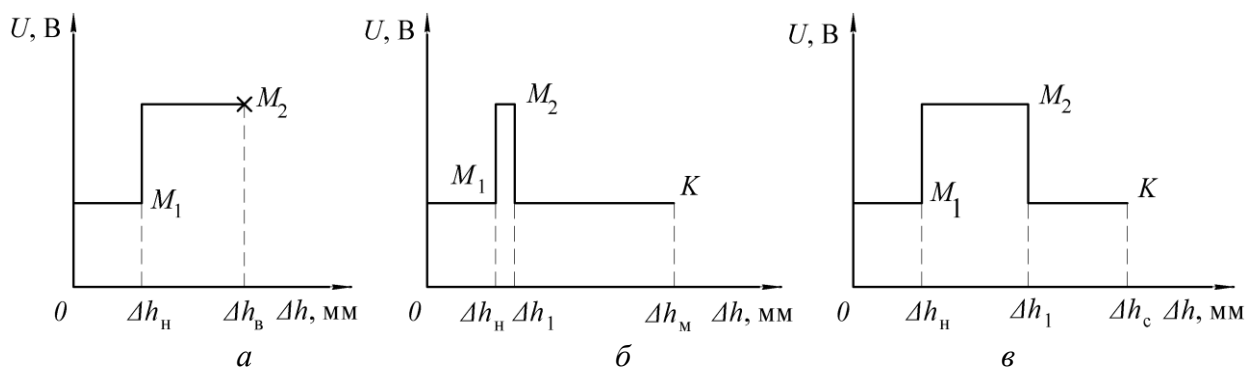


Рис. 5 – Ходограми витягування заготованок різних розмірів: *a* – «великої»; *б* – «малої» та *в* – «середньої»

Далі авторами проведено кількісне дослідження деформованого стану заготованок різних розмірів. Для цього використали метод прецизійних координатних сіток [5]. Його суть полягає в тому, що замість ортогональної (або будь-якої іншої) сітки, що утворюється дряпанням (або іншим способом), використовується сітка, сформована виключно з вузлових елементів, які отримані шляхом вдавлювання індентора трикутної форми.

На вихідну заготованку діаметром D_3 по координатним осям x і y наносили трикутні мітки з кроком 2 мм. Крім того, по колу діаметром $D_3 - 2$ мм через кожні 45° наносили розетки з трьох міток. Відстані між мітками вимірювали на інструментальному мікроскопі до деформації і після невеликої

деформації. Далі результати вимірювань обробляли статистично. Отримали такі результати: для «великих» заготованок, які деформували без змащування, осередок деформації охоплює лише кільцеву частину вихідної заготованки в межах $R_{\text{п}} - r_{\text{п}} \leq r_{\text{од}} \leq R_{\text{м}} + r_{\text{м}} + \Delta$, але не розповсюджується на увесь фланець. Це означає, що при $r > R_{\text{м}} + r_{\text{м}} + \Delta$ фланець не деформований – там розташовується жорстка зона.

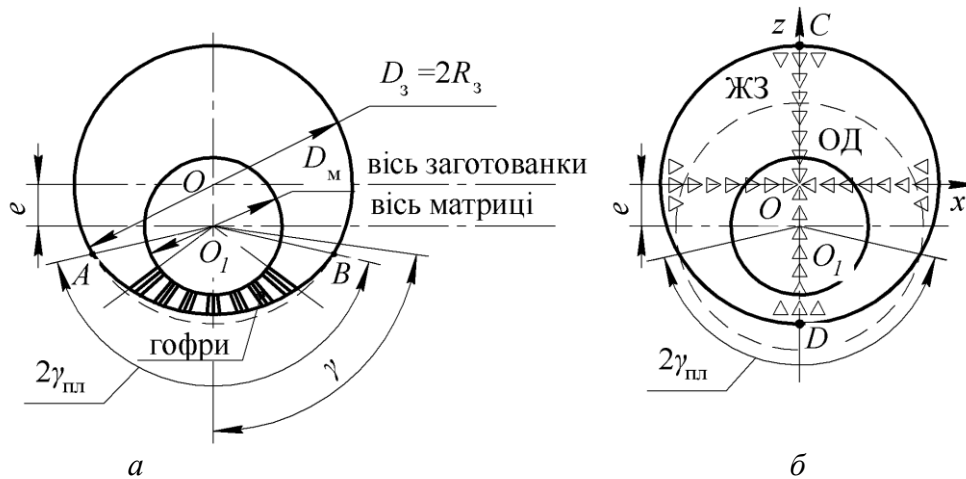
Експерименти з визначення деформованого стану виявились надзвичайно трудомісткими. Тому автори поки що не мають достатніх даних, щоб узагальнювати матеріал та виводити емпіричні формули. Проте нам вдалося знайти простий і дуже ефективний підхід до аналізу деформованого стану фланця при витягуванні заготованок різних розмірів: «великих», «середніх» та «малих».

Відомо, що при витягуванні заготованок «середніх» розмірів без притиску або з невеликим зусиллям притиску на периферії фланця формуються гофри, а при витягуванні «великих» заготованок гофри не утворюються. Щоб встановити якісно наявність переходу від заготованок «середніх» розмірів до заготованок «великих» розмірів, витягували заготованки з великим ексцентриситетом. На рис. 6, а добре видно, що при $R_3 > 1,8 R_{\text{м}}$ гофри не утворюються, а при $R_3 < 1,8 R_{\text{м}}$ вони чітко ідентифікуються.

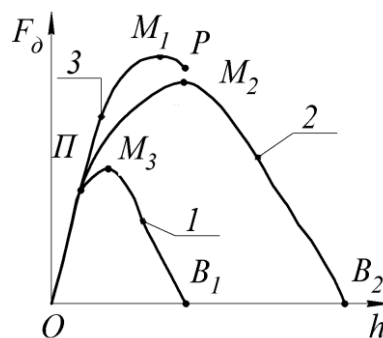
Для кількісного аналізу на заготованку діаметром 90 мм наносили дві системи координатних сіток, як це показано на рис. 6, б. Перша система – ортогональна з кроком 2 мм (розетки P_z), друга – кругова, також із кроком 2 мм, але у вигляді розеток по три мітки (P_{ϕ}). Відстані між мітками визначали на інструментальному мікроскопі БМИ-1 до деформації із випадковою похибкою ± 1 мкм, а після деформації – із похибкою ± 5 мкм. Заготованку деформували так, що осі заготованки і матриці не збігались на 22 мм. Це дозволило на одній заготованці моделювати витягування одночасного витягування кількох заготованок з коефіцієнтами витягування від 0,242 до 0,726.

В межах кута $2\gamma_{\text{пл}}$ пластична деформація фланця виражена явно (див. рис. 6, а). На частині фланця, де $\phi < 180 - \gamma_{\text{пл}}$, деформація не спостерігається.

На експериментальному стенді, базою якого слугувала універсальна дослідна машина УИМ-50, записували графіки залежності зусилля витягування F_{δ} від переміщення пуансона Δh . Графіки $F_{\delta} = f(\Delta h)$ подані на рис. 7.

Рис. 6 – Зразок: *a* – після несиметричного витягування; *б* – схема розмічування

Для витягування «великих» заготовок характерна крива $ОПМ_1P$. Такі заготовки деформуються в одну стадію: відбувається потоншення кільцевої області, її значне зміцнення і деформація до руйнування (відрив донця). Максимум на кривій (точка M_1) визначає початок утворення «шийки»; точка P відображує руйнування донця заготовки.

Рис. 7 – Типові графіки залежності зусилля витягування F_0 від ходу пуансона Δh для різних заготовок: 1 – «малої»; 2 – «середньої»; 3 – «великої»

Для витягування «малих» заготовок характерна крива $ОМ_3B_1$. Тут зразу ж починається втягування заготовки в матрицю. Вихід фланця на тороподібну поверхню матриці (коли $R_\phi = R_m + r_m$) відповідає точці M на кривій. Далі починається зменшення зусилля майже до нуля (коли фланець повністю перетвориться на вертикальну стінку).

Для витягування «середніх» заготовок характерна крива $ОПМ_2B_2$. Оскільки розмір цієї заготовки більший, ніж «малої», остільки довжина кривої $ОПМ_2B_2$ більша за довжину кривої $ОМ_3B_1$. Тут максимум (точка M_2) також визначається умовою $R_\phi = R_m + r_m$.

Треба підкреслити дуже важливий експериментальний факт: при витягуванні заготованок різних розмірів точка P може змінювати своє положення, але при будь-яких розмірах заготовки (якщо ця заготовка дійсно «середня»!) вона (точка P) залишається на кривій $ОПМ_2P_2$.

Висновки. 1. Експериментальні дослідження підтвердили, що три схеми деформації, зазначені авторами в раніше опублікованих роботах, дійсно мають місце. 2. Отримані експериментальні дані, що характеризують формозміну і силовий режим витягування вісесиметричних деталей, які дозволяють обґрунтувати більш досконалу математичну модель процесу витягування і підійти до створення підсистеми САПР розроблення процесів витягування і конструювання робочого інструмента.

Список літератури: 1. Ковка и штамповка: Справочник в 4-х томах. Том 4. Под ред. *А.Д. Матвеева*. М: Машиностроение, 1987. 2. *Романовский В.П.* Справочник по холодной штамповке. Изд. 2-е. М.-Л.: Машиностроение, 1954. 3. *Евстратов В.А., Торяник В.В., Левченко В.Н.* Анализ процесса вытяжки // Кузнечно-штамповочное производство, 1996. – №4. – С. 2-5. 4. *Евстратов В.А., Левченко В.Н.* Влияние упрочнения на силовой режим вытяжки // Труды международной научно-технической конференции 12-14 мая 1997 г., часть 5, Харьков, 1997, С. 166-169. 5. А.с. 1064128 СССР, МКИ G 01 В 11/16. Способ определения деформаций.

Надійшла до редколегії 29.04.2014

УДК 621.771.634

А. А. КОРЕНЬКОВА, магістрант, НТУ «ХПІ»;

Ю. А. ПЛЕСНЕЦОВ, канд. техн. наук, с. н. с., НТУ «ХПІ».

АНАЛИЗ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ ПРИ ВАЛКОВОЙ ФОРМОВКЕ ГНУТЫХ ПЕРФОРИРОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ

Исследования показали, что деформируемость круглых отверстий увеличивается с возрастанием углов подгибки, толщины металла, уменьшением ширины подгибаемых полок и величины перемычки между отверстиями. Величина отклонения в размерах отверстий по сравнению с исходными составляет 0,07-1,08% у угловых профилей и 0,07-3,20% у швеллерных. В работе установлено, что при формовке перфорированных профилей по жестким режимам происходит многократное возрастание деформирования отверстий.

Ключевые слова: профили перфорированные, формовка, валки, отверстия, формоизменение.

Введение. Перфорированные профили – перспективный вид металлопродукции, успешно применяемый в промышленности и строительстве, и получающий всё большее распространение. Значение профилирования в последнее годы непрерывно возрастает благодаря дешевизне изготовления гнутых профилей, высокой производительности оборудования, возможности сочетания профилирование с другими технологическими операциями

(пробивкой отверстий, сваркой, нанесением покрытий), многообразие сортамента, хорошему внешнему виду изделий. Развитие процессов профилирования позволило создать эффективный вид металлопродукции – гнутые перфорированные профили, необходимые, как для машиностроения, строительства, так и других отраслей экономики Украины.

Актуальность выполненной работы определяется отсутствием в нашей стране крупносерийного промышленного производства гнутых перфорированных профилей, значительной потребностью различных отраслей экономики Украины в этих профилях, необходимостью организации их промышленного производства.

Необходимость проведения настоящей работы обосновывается также и тем, что, не смотря на значительную потребность в гнутых перфорированных профилях в Украине, теоретические вопросы процесса профилирования разработаны недостаточно полно и в основном относятся к производству гнутых профилей, не имеющих перфорации.

С учетом изложенного, необходимо проведение дальнейших исследований процесса профилирования перфорированных гнутых профилей, которые позволили бы получить теоретически обоснованное решение комплекса задач, возникающих при проектировании технологии их изготовления.

Анализ литературы. С целью выбора рационального способа перфорирования при выполнении настоящей работы были изучены различные способы изготовления отверстий: сверление на агрегатных станках, ультразвуковых, электроискровых и электроимпульсных установках, ротационных машинах с помощью вращающихся валков и пробивкой в штампах [1–6].

Из этих способов рациональным является перфорирование в штампах, установленных на прессах–автоматах, обеспечивающих автоматическую подачу полосы на величину заданного шага.

При помощи штампов, установленных на прессах–автоматах, в заготовках из полосового материала можно пробивать отверстия самой различной формы с высокой степенью точности и чистоты обработки.

Целью исследований является анализ формоизменения отверстий на элементах гнутых профилей при их валковой формовке.

Результаты исследований. Исследование влияния условий профилирования на величину изменения размеров отверстий, предварительно пробитых в исходных заготовках, производили на специальных контрольных полосах. Отверстия круглые калиброванные диаметром 14 мм изготавливали сверлением и пробивкой в штампе по схеме, приведенной на рис. 1. Отверстия измеряли с точностью до 0,01 мм при помощи нутромера типа НИ с индикатором. Подготовленные подобным образом заготовки формовали на профилегибочном стане в уголкового и швеллерные профили, после чего отверстия вновь обмеряли. Результаты измерений до и после профилирования сравнивали, разность в показаниях индикатора составляла абсолютную величину изменения размером отверстий, относительное же изменение размеров определяли по формуле:

$$\Delta d = \frac{d_1 - d}{d} 100,$$

где Δd – относительная величина изменения размеров отверстий;

d – диаметр отверстия до профилирования, мм;

d_1 – диаметр отверстия после профилирования, мм.

Исследованиями установлено, что в процессе профилирования в зависимости от различных факторов (ширины подгибаемых элементов, режима профилирования, величины перемычки между отверстиями, марки стали) размеры отверстий изменяются различно.

Влияние режима профилирования. На рис. 1, а показано изменение размеров отверстий на полках швеллера 100x40x3 мм при прохождении полосы из клетки в клетку. Из приведенного графика видно, что при формовке профиля в калибрах профилегибочного стана, на подгибаемых полках швеллера происходит постепенное изменение размеров отверстий. Так, если при подгибке полок на 8° еще не заметно изменение размеров отверстий, то начиная с углов подгибки, равных 18°, и до угла подгибки 70° формоизменение отверстий возрастает. В готовом профиле отверстия на полках деформированы, причем эллипсообразность отверстий хорошо различима даже без измерительных приборов. Максимальная величина относительного удлинения отверстий составляла 1,89%, сужения – 3,2%. Следовательно, при прохождении полосы из клетки в клетку происходит постепенное изменение формы и размеров отверстий, которое объясняется увеличением продольной деформации кромок подгибаемых полок. Для определения влияния дробности деформации при профилировании на величину изменения размеров отверстий были изготовлены

швеллеры по разным режимам профилирования. Так, в первом случае швеллеры 100x80x3 мм профилировали по обычному режиму подгибки полок: 8°-18°-30°-44°-58° и т.д., а в другом – полки аналогичного швеллера формовали по более жесткому режиму, при котором за один проход полки подгибали на 18°, 30°, 44°, 58°, минуя предыдущие клетки.

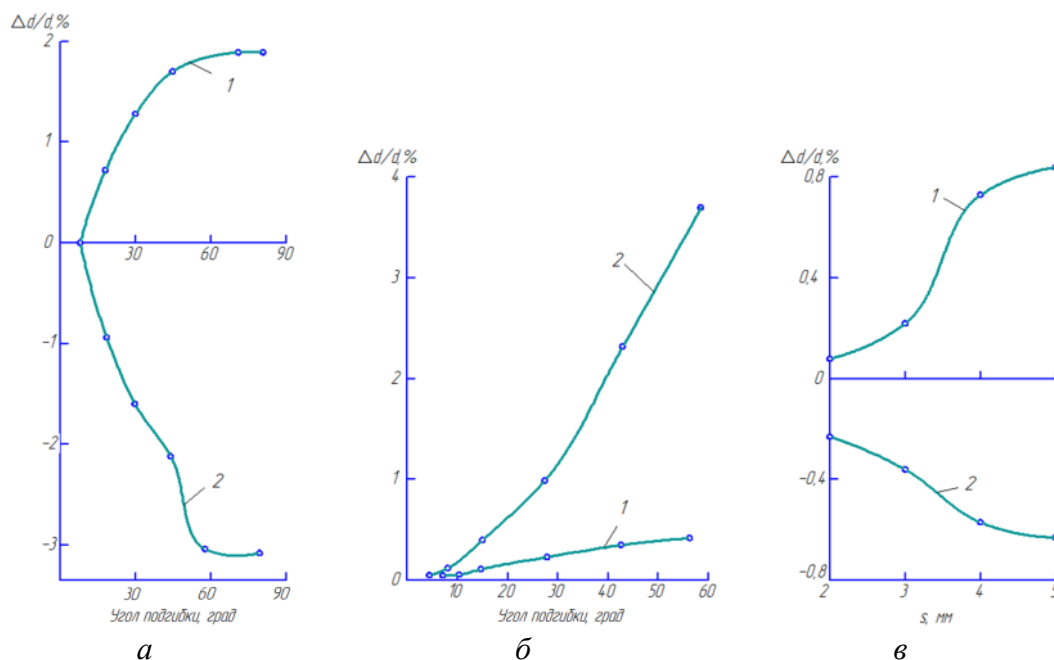


Рис. 1 – Изменение $\Delta d/d(1)$ и $-\Delta d/d(2)$ отверстий в процессе профилирования в зависимости от: а, б – углов подгибки; в – толщины металла s

Сравнение относительного изменения размеров отверстий показало, что при обычном режиме, по которому полки швеллера подгибали постепенно из клетки в клетку, изменение размеров отверстий было минимальным (рис. 1, б, 1). При подгибке полок по жесткому режиму, когда они подгибались сразу на большие углы, изменение размеров отверстий резко возросло (рис. 1, б, 2).

Например, при формовке швеллера в шестой клетки полоса подгибалась до 58°. При подгибке полок по режиму 8°-18°-30°-44°-58° относительное изменение размеров отверстий составляло 0,42%. Подгибка полок до угла 58°, осуществленная за один проход, привела к возрастанию деформирования отверстий почти в 9 раз. При этом величина относительного изменения размеров отверстия достигла 3,71%. Кроме того, на полках наблюдалось появление гофров, высота волны которых достигала 8–9,5 мм.

С учетом изложенного, при профилировании перфорированных профилей необходимо учитывать то обстоятельство, что резкое увеличение углов подгибки приводит к многократному возрастанию деформирования отверстий.

Поэтому для получения качественных, имеющих минимальные отклонения отверстий, необходимо, чтобы углы подгибки были небольшими. Следует, однако, отметить, что изменение режима профилирования не оказывает заметного влияния на деформирование отверстий, расположенных на стенке швеллеров. При этом необходимо, чтобы кромки отверстий находились от места изгиба на расстоянии, равном не менее 3,5 толщин металла.

Влияние толщины исходной заготовки. Общеизвестно, что с увеличением толщины профилируемых полос растягивающие деформации на кромках полос также увеличиваются. Это объясняется тем, что при большой толщине поперечная жесткость полосы возрастает и для перехода ее кромки из горизонтального положения в наклонное необходимо прилагать большие усилия.

С увеличением деформации продольных кромок претерпевают изменения и прилегающие к ним слои металла. Поэтому можно ожидать, что отверстия, имеющиеся в полках профилей различной толщины, будут деформироваться по-разному.

Для исследования влияния толщины заготовки на величину изменения размеров отверстий профилировали уголки с одинаковой шириной полок 45x45 мм, но с различной толщиной стенки 2 мм, 3 мм, 4 мм и 5 мм.

Результаты проведенных исследований показали, что с увеличением толщины подгибаемых полок величина деформирования отверстий возрастает (рис. 1, в). Минимальному деформированию подвергались отверстия в полках уголков толщиной 2 мм, максимальному – толщиной 5 мм. Так, при толщине полок 2 мм относительное удлинение отверстий составляло 0,07%, сужения – 0,21%. При толщине металла 5 мм деформирование отверстий возросло в несколько раз и составляло 0,8% и 0,63%, соответственно.

Следовательно, результаты проведенных исследований не противоречат сделанным ранее выводам о характере изменения растягивающих деформаций кромок профилей в зависимости от толщины металла. Деформирование отверстий имеет аналогичную закономерность (с увеличением толщины подгибаемых полок деформирование возрастает, с уменьшением – падает).

Влияние ширины подгибаемых элементов. Ширина подгибаемых элементов профиля оказывает существенное влияние на величину продольной деформации кромок. Исследованиями установлено, что у швеллеров с различной шириной полок наибольшая продольная деформация наблюдалась

на кромках тех швеллеров, которые имеют минимальные ширины. С увеличением ширины подгибаемых полок величина продольной деформации кромок уменьшается.

Для определения влияния ширины подгибаемых полок на величину формоизменения отверстий профилировали разнобокие уголки с шириной полок 45 мм, 60 мм и 80 мм. Схема расположения отверстия на полках аналогична приведенной на рис. 3. Обработки результатов измерений отверстий до и после профилирования показала, что наибольшему деформированию подвергались отверстия, расположенные на полках шириной 45 мм, наименьшему – на полках уголков с шириной полок 80 мм (рис. 2, а). Так, относительное удлинение отверстий на полках шириной 45 мм составляло 1,08%, сужение – 0,38%. На полках шириной 80 мм эти величины составляли 0,22% и 0,05% соответственно.

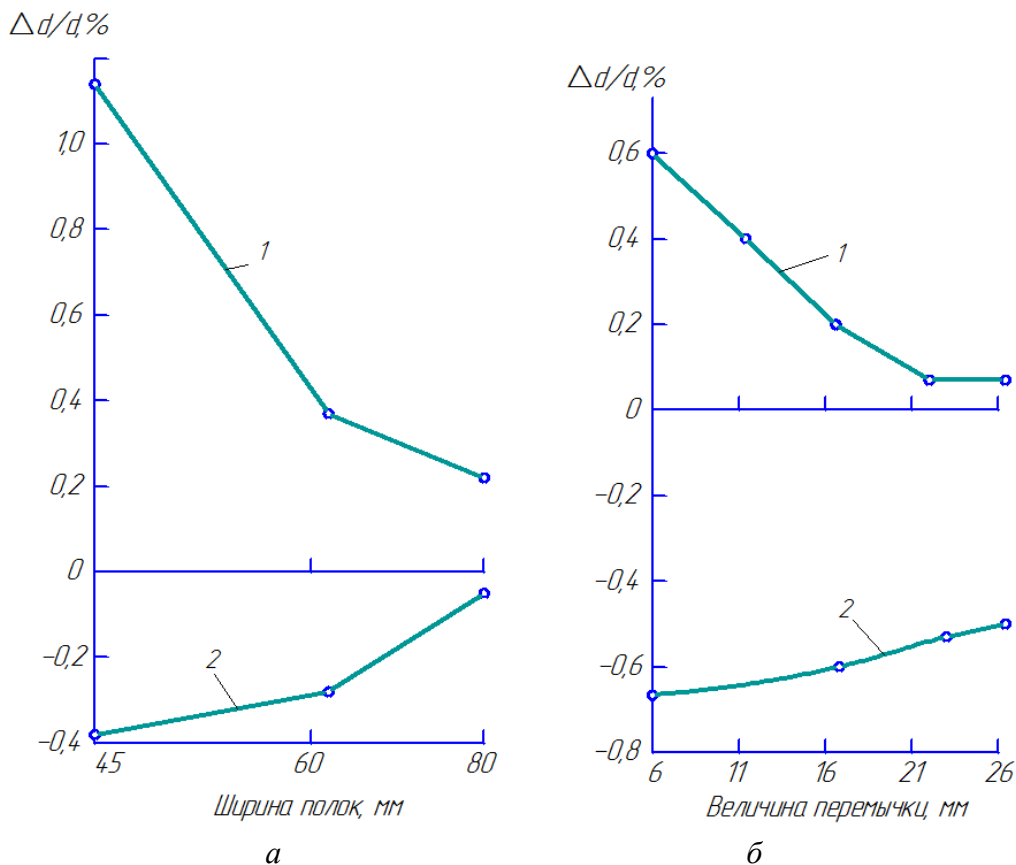


Рис. 2 – Изменение $\Delta d/d(1)$ и $-\Delta d/d(2)$ отверстий в процессе профилирования в зависимости от: а – ширины подгибаемых полок; б – величины перемычки между отверстиями

Увеличение в несколько раз деформирования отверстий на уголках с шириной полок 45 мм по сравнению с деформированием отверстия на полках с

уголка с шириной 80 мм является результатом увеличения продольной деформации кромок и прилегающих к ним слоев в процессе профилирования, т.е. наблюдается полное совпадение деформирования отверстий с общей деформацией металла подгибаемых элементов.

Выводы:

1. Исследования показали, что при прохождении полосы из клетки в клетку происходит постепенное изменение формы и размеров отверстий, которое объясняется увеличением продольной деформации кромок подгибаемых полок. Максимальная величина относительного удлинения отверстий составила 1,89%, сужения – 3,2%.

2. В работе установлено, что при формовке перфорированных профилей по жестким режимам происходит многократное возрастание деформирования отверстий. Вместе с тем, изменение режима профилирования не оказывает заметного влияния на деформирование отверстий, расположенных на стенке швеллеров при условии расположения кромок отверстий от места изгиба на расстоянии, равном не менее 3,5 толщин металла.

3. Результаты проведенных исследований показали, что с увеличением толщины подгибаемых полок величина деформирования отверстий возрастает. Так, при толщине полок 2 мм относительное удлинение отверстий составляло 0,07%, сужение – 0,21%, при толщине металла 5 мм деформирование отверстий составляло 0,8% и 0,63%, соответственно.

4. Деформируемость круглых отверстий увеличивается с возрастанием углов подгибки, толщины металла, уменьшением ширины подгибаемых полок и величины перемычки между отверстиями. Величина отклонения в размерах отверстий по сравнению с исходными составляет 0,07-1,08% у уголковых профилей и 0,07-3,20% у швеллерных.

Список литературы. 1. *Тришевский И. С.* Теоретические основы процессов профилирования / И. С. Тришевский, М. Е. Докторов. – М.: Металлургия, 1980. – 288 с. 2. *Тришевский И.С.* Калибровка валов для производства гнутых профилей проката / под ред. И.С. Тришевского. – Киев: Техника, 1980. – 288 с. 3. *Тришевский И.С.* Производства гнутых профилей (оборудование и технология) / под ред. И.С. Тришевского и др. – М.: Металлургия, 1982. – 384 с. 4. Применение гнутых профилей проката: справочник / И. С. Тришевский, Г. В. Донец, М. Е. Докторов и др. – М.: Металлургия, 1975. – 421 с. 5. *Березовский С.Ф.* Производство гнутых профилей: С.Ф. Березовский, И.С. Тришевский. – М.: Металлургия, 1985. – 200 с. 6. *Тришевский И.С.* Гнутые профили проката: справочник / И.С. Тришевский, В. В. Лемпицкий, Н.М. Воронов и др. / под ред. И.С. Тришевского. – М.: Металлургия, 1980. – 351 с.

Поступила в редколлегию 24.04.2014

УДК 621.73

В. В. КУХАРЬ, докт. техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ», Мариуполь

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОФИЛИРОВАННЫХ ЗАГОТОВОК ПОСЛЕ ПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ ОСАДКИ ШТАМПОВЫМИ ВСТАВКАМИ РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Проанализированы особенности формоизменения заготовок при осадке штамповыми вставками с плоской, выпуклой и конической геометрией рабочей поверхности. Выполнена систематизация и сопоставление конфигураций профилированных заготовок, полученных способами осадки, с базовой номенклатурой поковок, штампуемых на прессовом оборудовании. Определены структурные составляющие технологий штамповки типовых изделий различной номенклатуры на основе предварительного профилирования заготовок осадкой штамповыми вставками различной геометрии.

Ключевые слова: заготовка, профилирование, осадка, формоизменение, штамповые вставки, объемная штамповка, определение номенклатуры поковок.

Введение. В современной металлообрабатывающей отрасли особенно остро стоят вопросы энергоресурсосбережения и обеспечения конкурентоспособности продукции на внутреннем и внешнем рынках. Большую часть сортового проката простого профиля далее перерабатывают ковкой или штамповкой. При этом проблема приближения формы заготовки к конфигурации поковки, т.е. профилирования для увеличения коэффициента выхода годного, является одной из основных отраслевых проблем. Как правило, штамповка на прессовом оборудовании характеризуется меньшей материалоемкостью, чем штамповка на молотах, из-за более жестких припусков, что позволяет успешно решать другую важную проблему – приближение конфигурации поковки к форме детали.

Последовательное перераспределение металла в ручьях штампов кривошипных горячештамповочных прессов (КГШП), как это делают в ручьях штамповочных молотов, осложнено из-за постоянства величины хода КГШП и ограничения количества ручьевых вставок в штамповом блоке. При гибком многономенклатурном производстве неопределенной серийности профилирование на прессах не выполняют, что сужает их технологические возможности, вызывает перерасход металла заготовки, ускоренный износ штампов и рост энергосиловых затрат на деформирование.

Решение указанных противоречий для многих типов поковок делает необходимым научно-технологическое развитие процессов получения профилированных заготовок сложной конфигурации инструментом простой

формы, когда предварительное деформирование выполняют путем свободного формоизменения вне ручьев штампов в рабочем пространстве основного оборудования. Предварительная осадка штамповыми вставками простого профиля является одним из направлений безручьевого профилирования заготовок перед объемной штамповкой поковок разнообразной номенклатуры.

Анализ последних исследований и литературы. Наиболее распространенными приемами перераспределения металла заготовки в необходимом направлении при обработке металлов давлением являются обжатия инструментом заданной конфигурации. Отмечены существенные различия закономерностей распределения деформаций по объему заготовок (рис. 1), осаженных выпуклыми и вогнутыми плитами [1].



Рис. 1 – Образцы с координатной сеткой, осаженные *а* – выпуклыми и *б* – вогнутыми сферическими плитами [1]

Схема осадки выпуклыми сферическими плитами способствует лучшему закрытию дефектов в осевой зоне литых заготовок, в то время как осадка вогнутыми сферическими плитами сопровождается локальной проработкой металла [1]. В последнем случае даже обжатия до 50 % не приводили к заковке дефектов, расположенных в приконтактной зоне. В технологиях горячей штамповки, когда деформируют сортовой прокат (т.е. проработанный металл), необходимость в заковке дефектов отсутствует. При осадке на вогнутых плитах горизонтальные проекции нормального давления и силы трения складываются, а при выпуклых плитах вычитаются. Неравномерность высотной деформации при осадке сферическими вогнутыми и выпуклыми плитами приводит к тому, что изначально цилиндрическая заготовка превращается в тело вращения с профилированной боковой и торцевой поверхностью.

Несмотря на кажущуюся простоту, операция осадки обладает рядом нерешенных задач формоизменения, на которое влияют различные факторы:

условия на контакте [2], температура и её распределение по объёму заготовки [3], свойства материала заготовки [4], состояние и форма инструмента [5], скорость деформирования [4; 6] и др. Рассмотрение напряженно-деформированного состояния при различных видах осадки заготовок положено в основу разработанной А.Л. Воронцовым теории малоотходной штамповки [7]. В работе этого же автора [8] приобрели дальнейшее развитие методы прогнозирования формоизменения заготовок при осадке, причем формулы получены для свинцовых (С00) заготовок, как моделирующих горячую деформацию малоуглеродистых сталей. Формы бочкообразности (одинарная и двойная) при осадке модельных свинцовых образцов различной высоты были описаны в ряде классических трудов [9–10]. Количественные характеристики бочкообразности при осадке заготовок из других материалов, в том числе цветных металлов и сплавов, изучены не были.

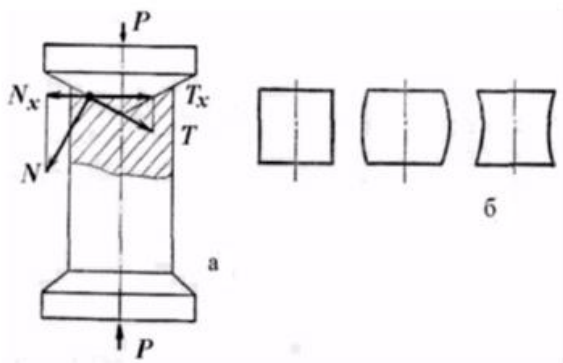


Рис. 2 – Осадка заготовок: *a* – коническими плитами; *б* – форма боковой поверхности образцов [13]

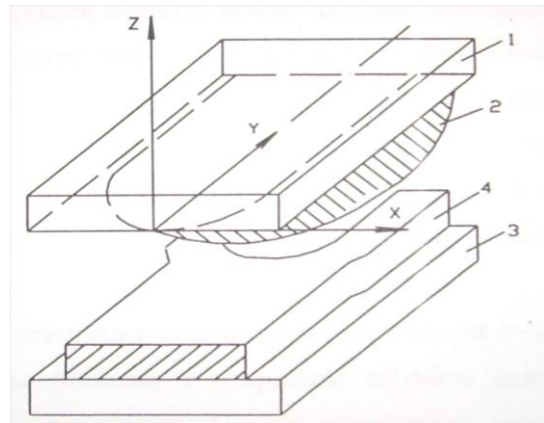


Рис. 3 – Ковка полосы эллипсоидным бойком [14]: 1 и 3 – верхняя и нижняя плоские плиты; 2 – эллипсоидный боек; 4 – заготовка

В практике штамповки осадка успешно комбинируется с другими операциями обработки материалов давлением. При постоянстве спроса на продукцию, полученную осадкой или высадкой, перспективно изменение формы исходной заготовки [11]. Использование особенностей течения металла при осадке заготовок инструментом, который имеет несимметричную относительно вертикальной оси форму давящей поверхности, позволило авторам [12] предложить способы восстановления размеров осесимметричных деталей при одностороннем износе. Осадку заготовок в выпуклых конических бойках (рис. 2) используют в методе определения коэффициента контактного

трения [13]. Технология проведения эксперимента требует предварительного изготовления в торцах заготовок выточек, а исследования обычно заключаются в проверке сохранения боковой поверхностью образцов цилиндрической формы (при угле выточки равной углу трения) или приобретения ей выпуклого или вогнутого профиля (см. рис. 2). Известен способ осадки заготовок верхним бойком [14] в виде эллиптического параболоида (рис. 3), что позволяет снизить силу деформирования, исключить образование жестких зон и повысить равномерность деформации при последующей правке плоским бойком.

Известная операция протяжки заготовок является совокупностью последовательно произведенных операций осадки, чередующихся с подачей в продольном направлении. Операции протяжки в практике штамповки реализуются в протяжных ручьях штамповочных молотов [15]. Протяжка плоскими плитами сопровождается образованием «языков», удаляемых с технологической обрезаю, величина которой может достигать 5...20 % от массы заготовки [1]. Применение выпуклых плит увеличивает выход годного за счет снижения концевых обрубков не менее чем на 3 % [16, 17], что актуально при ковке крупных поковок и крупносерийном производстве штампованных изделий.

Для эффективного приближения формы заготовки к конфигурации штампуемой поковки широко используют принципы «максимума свободных поверхностей» [18], когда уменьшают площадь контакта заготовки с инструментом, что приводит к снижению его износа, уменьшению энергосиловых затрат на деформирование. Данные принципы находятся в полном соответствии с концепцией безручьевого профилирования заготовок на прессах [19]. В работе [20] определены направления реализации безручьевого профилирования заготовок с обобщением способов осадки, продольного изгиба, растяжения с разрывом и профилирования с использованием градиентного нагрева заготовок. При этом каждое отдельное направление требует конкретизации номенклатуры поковок, которая основана на топологических и морфологических признаках.

Цель исследования, постановка проблемы. Целью настоящей работы является разработка направлений использования профилированных заготовок, полученных осадкой штамповыми вставками различной конфигурации. Для достижения поставленной цели необходимо сопоставить конфигурации профилированных заготовок, получаемых после осадки плитами различного

профиля, по признакам формы и выполнить систематизацию технологических способов производства типовых изделий различной номенклатуры из профилированных заготовок, получаемых на основе операций осадки.

Материалы исследования. Особенности формоизменения заготовок при подготовительной осадке плитами различной профилировки определяют направления её использования в технологиях производства широкой номенклатуры поковок. На рис. 4 приведены основные варианты профилирования заготовок осадкой и систематизация типовых изделий, при этом выделено три стадии прохождения полупродукта: А – заготовок, профилируемых инструментом разной конфигурации (I – плоские плиты, II – конические плиты, IIIа и IIIб – выпуклые продолговатые плиты); Б – профилированных заготовок (полуфабрикатов); В – готовых поковок.

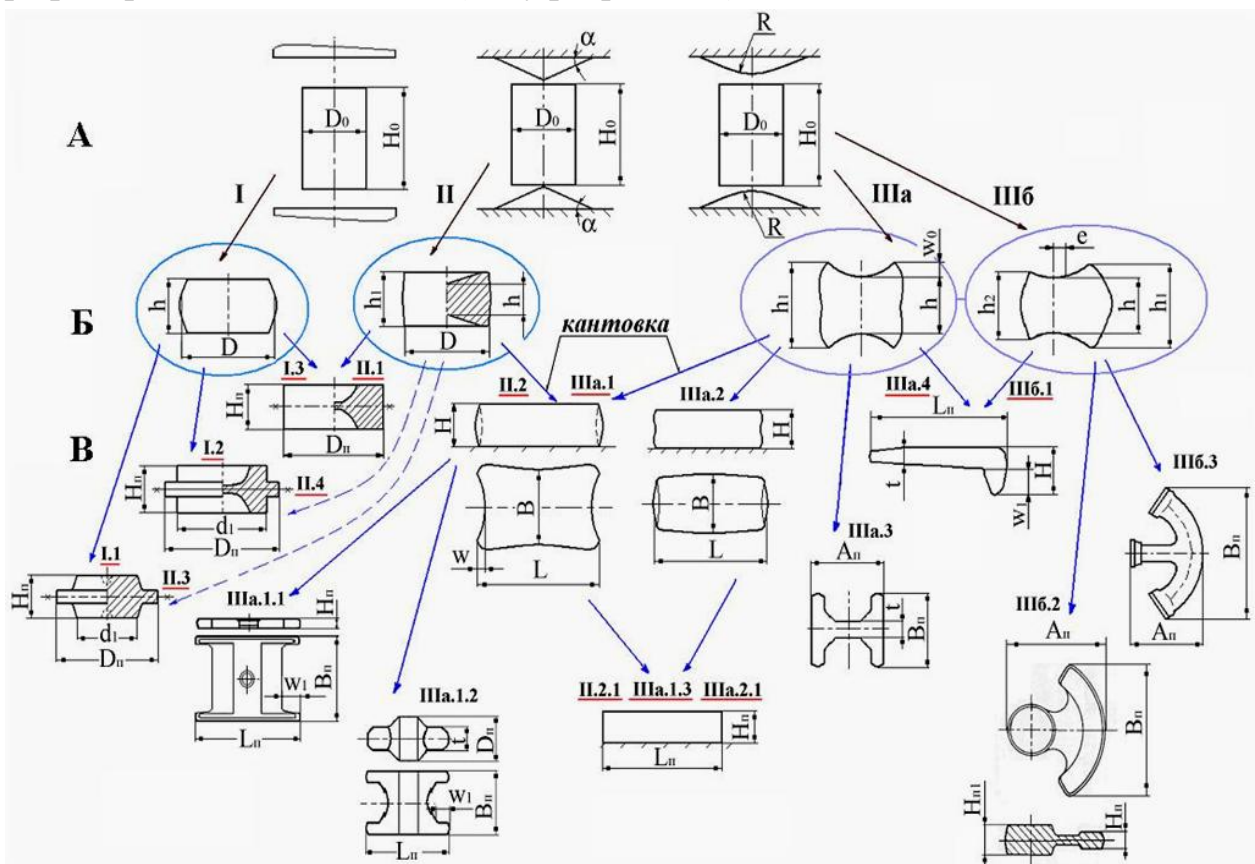


Рис. 4 – Направления использования профилированных заготовок после осадки плитами различной конфигурации

Управление бочкообразностью полуфабрикатов при осадке плоским инструментом (см. рис. 4) позволяет достигать их наилучшего приближения к конфигурации круглых в плане поковок: I.1 – дисковых сплошных (типа шестерен, зубчатых колес и т.п.); I.2 – дисковых полых (типа зубчатых колес,

крышек, муфт и т.п.); I.3 – цилиндрических (конических) полых или сплошных (втулок, сопел, колес и т.п.). Профиль бочки, получаемой при предварительной осадке, облегчает затекание металла в радиально расположенные полости верхней и нижней половин штампа, предназначенных для формирования бурта поковок типа I.1 и I.2 (см. рис. 4) диаметром $D_{п}$, способствует снижению энергосиловых затрат и улучшению условий финишного формообразования в технологиях производства поковок тел вращения [21].

Схема подготовительной осадки коническими плитами (II) с отсутствием бочкообразования или малым отклонением образующей от цилиндрической формы способствует сокращению машинного времени или исключению операции обкатки по диаметру при производстве дисковых поковок ковкой, а также с достаточной степенью точности приближает форму полуфабриката к конфигурации штампованных поковок типа ободьев и колес (II.1 = I.3, см. рис. 4).

Для снижения неравномерности деформации, а также при предъявлении специальных требований к проработке или макроструктуре металла по объему окончательной поковки, данная подготовительная операция может быть распространена (связь показана тонкими штриховыми линиями) на изделия типа II.3=I.1 и II.4=I.2 (см. рис. 4). Формоизменение и напряженно-деформированное состояние на начальных стадиях осадки коническими плитами и прошивки коническими прошивнями (при ковке) или прошивниками штампов (при штамповке) является равнозначным. При применении кантовки и последующего радиального обжатия осаженой заготовки достижимы условия формирования боковых и торцевых вогнутостей (II.2, см. рис. 4), которые выравниваются при производстве плоских поковок способами кузнечной протяжки или объемной штамповки (II.2.1, см. рис. 4), снижая перерасход металла с обрезью или облоем соответственно.

Качественно тот же эффект реализуется при предварительной осадке выпуклыми продолговатыми плитами с центральным (IIIa) внедрением в торцы заготовки, когда профилирование заготовки перед завершающими кузнечными операциями или штамповкой позволяет усовершенствовать технологии производства поковок пластин [17, 22]. На базе промежуточных полуфабрикатов (IIIa.1 и IIIa.2, см. рис. 4) выполняма штамповка поковок типа пластин с боковыми горизонтальными симметричными отростками (IIIa.1.1), типа цилиндрических муфт или спаренных вилок с горизонтальными

отростками (Ша.1.2), типа прямоугольных пластин (Ша.1.3 = Ша.2.1 = П.2.1), поковок с сечением близким к двутавровому (Ша.3), поковок с наличием одного или нескольких вертикальных отростков (Ша.4). Осадка выпуклыми продолговатыми плитами с эксцентриситетом внедрения в торцы заготовки приводит к формированию полуфабрикатов (Шб), на основе которых рационально штамповать поковки с тонким полотном и наличием вертикальных отростков (Шб.1 = Ша.4), поковки с изогнутой осью и наличием центрального утолщения (Шб.2) или отростка (Шб.3). Обжатие выпуклой продолговатой плитой с шириной меньшей, чем диаметр заготовки, также как и плоским сектором, способствует интенсификации радиального течения при разгонке дисковых поковок [23] и соответствует начальным условиям внедрения валкового (радиусного) инструмента в торец заготовки, что показано в работах [21, 24].

Таким образом, определена номенклатура поковок, к которым рационально применять профилирование заготовок осадкой инструментом простой конфигурации, предложены базовые технологические переходы, устройства и инструмент для совершенствования процессов их изготовления.

Выводы. Проанализированы особенности формоизменения заготовок при осадке штамповыми вставками различного профиля (плоские, выпуклые, конические). Выполнена систематизация и сопоставление конфигураций профилированных заготовок, полученных способами осадки, с базовой номенклатурой поковок, штампуемых на прессовом оборудовании. Показана перспектива расширения технологических возможностей кривошипных горячештамповочных прессов при использовании безручьевого профилирования заготовок перед штамповкой поковок пластин. Определены основные структурные составляющие технологических переходов штамповки типовых изделий различной номенклатуры на основе предварительного профилирования заготовок осадкой штамповыми вставками различной геометрии.

Список литературы: 1. *Тарновский И. Я.* Свободная ковка на прессах / *И. Я. Тарновский, В. Н. Трубин, М. Г. Златкин.* – М.: Машиностроение, 1967. – 328 с. 2. *Добров И. В.* Анализ процессов трения твердых и пластически деформируемых тел в механике машин на примере осадки симметричной заготовки плоскими бойками / *И. В. Добров* // Кузнечно-штамповочное производство – Обработка металлов давлением. – 2009. – № 3. – С. 3–9. 3. *Воронцов А. Л.* Исследование осадки цилиндрической заготовки с затрудненным течением металла на одном из торцов / *А. Л. Воронцов* // Вестник машиностроения. – 2009. – № 2. – С. 67–74. 4. Inverse analysis applied to the evaluation of friction and rheological parameters in hot forming of steel / *Szyndler D., M. Pietrzyk, J. G. Lenard, S. H. Fyke* // Proc. 8th International Conference Metal Forming' 2000, Sept. 3–7.2000. – Krakow; Poland,

2000. – Р.101–106. **5.** Биякаева Н. Т. Напряженно-деформированное состояние заготовки при штамповке в инструменте с изменяющейся рабочей формой / Н. Т. Биякаева // Кузнечно-штамповочное пр-во. Обработка материалов давлением. – 2009. – № 3. – С. 38–41. **6.** Яковлев С. П. Изменение коэффициента трения в зависимости от скорости деформирования и вида технологической смазки / С. П. Яковлев // Изв. вузов. Машиностроение. – 1987. – № 3. – С. 21–26. **7.** Воронцов А. Л. Теория малоотходной штамповки / А. Л. Воронцов. – М.: Машиностроение, 2005. – 859 с. **8.** Воронцов А. Л. Определение формы боковой поверхности заготовки при осадке / А. Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное пр-во. Обработка материалов давлением. – 2007. – № 3. – С. 7–16. **9.** Теория обработки металлов давлением / И. Я. Тарновский, А. А. Поздеев, О. А. Ганаго [и др.]; под ред. И. Я. Тарновского. – М.: Metallurgizdat, 1963. – 672 с. **10.** Теория и технологияковки / Л. Н. Соколов, Н. К. Голубятников, В. Н. Ефимов, И. П. Шелаев. – К.: Техніка, 1989. – 320 с. **11.** Unterschiedliche Erwartungen bei den Massivumformen // Stahlmarkleren. – 2003. 53. – № 6. – С. 99. **12.** Шибakov В. Г. Формоизменение изношенной детали при её восстановлении с помощью симметричного и несимметричного инструмента / В. Г. Шибakov [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2009. – № 3. – С. 41–44. **13.** Грудев А. П. Трение и смазки при обработке металлов давлением: справочник / А. П. Грудев, Ю. В. Зильберг, В. Т. Тилик. – М.: Metallургия, 1982. – 312 с. **14.** Кузнечный боек : а.с. 837530 СССР, МКИ В 21 J 5/00, J 13/02 / А. А. Мишулин [и др.]. – № 2828916/25–27; заявл. 09.10.79; опубл. 15.06.81, Бюл. № 22. – 2с. : ил. **15.** Бойцов В. В. Горячая штамповка / В. В. Бойцов, И. Д. Трофимов. – М.: Высш. школа, 1978. – 304 с. **16.** Ковка слитков на прессах / Л. Н. Соколов [и др.]; под ред. Л. Н. Соколова. – К.: Техніка, 1984. – 127 с. **17.** Пат. 44484 Україна, МПК(2009) В21К 1/00, В21J 5/00. Спосіб штампування поковок пластин / В. В. Кухар, В. А. Бурко, О. О. Лаврентік, А. В. Дубініна. – № 200902832; заявл. 26.03.2009; опубл. 12.10.2009, Бюл. №19. – 5с.: іл. **18.** Володин И. М. Система основных принципов проектирования процессов горячей объемной штамповки и созданные на её основе технологии / И. М. Володин, А. А. Ромашев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2008. – № 9. – С. 19–29. **19.** Гринкевич В. А. Бесштамповое профилирование на прессах с повышением точности формоизменения на окончательных операциях / В. А. Гринкевич, В. В. Кухарь, К. К. Діамантопуло // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – № 5. – 2010. – С. 19–23. **20.** Кухарь В. В. Направления реализации бесштампового профилирования заготовок на прессах / В. В. Кухарь // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2011. – № 7. – С. 173–179. **21.** Спосіб одержання дискових поковок [Текст]: пат. 10436 Україна, МПК⁷, В 21 J 5/05 / Волошин В. С., Діамантопуло К. К., Чепурний А. Д., Сердюк І. О., Кухар В. В. (Україна); заявник та патентовласник Приазовський державний технічний університет. – № u200504046; заявл. 26.04.2005; опубл. 15.11.2005, Бюл. № 11. – 3 с. **22.** Кухарь В. В. Технологические возможности подготовительного профилирования заготовок осадкой выпуклыми плитами перед горячей объемной штамповкой / В. В. Кухарь, В. А. Бурко // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. / ДГМА. – Краматорск, 2010. – № 4 (25). – С. 88–93. **23.** Пристрій для секційного штампування коліс [Текст]: пат. 5151 Україна, МПК⁷ В 21 J 5/05 / Волошин В. С., Каргін Б. С., Самотугін С. С., Гришко Ю. В., Ткачов Р. О., Кухар В. В. (Україна); заявник та патентовласник Приазовський державний технічний університет. – № 20040705651; заявл. 12.07.2004; опубл. 15.02.2005, Бюл. № 2. – 2с.; іл. **24.** Пристрій для прокатування дискових поковок [Текст]: пат. 9687 Україна, МПК⁷, В 21 J 5/05 / Кухар В. В., Діамантопуло К. К., Сердюк І. О. (Україна); заявник та патентовласник Приазовський державний технічний університет. – № u200502108; заявл. 09.03.2005; опубл. 17.10.2005, Бюл. № 10. – 4 с.; іл.

Поступила в редколлегию 21.12.2013

УДК 621.983

В. В. КУХАРЬ, докт. техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ», Мариуполь;
М. О. ЛЕСОВОЙ, ассистент, ГВУЗ «ПГТУ», Мариуполь.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЕРВОГО ЭТАПА ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ И ТРУБ НА МЕРНЫЕ ДЛИНЫ

Предложен новый способ безотходного разделения гнутых движущихся профилей и труб на мерные длины без участия уникального дорогостоящего оборудования, позволяющий осуществлять резку мерных заготовок без остановки стана. Разработана математическая модель напряженно-деформированного состояния металла на первом этапе формовки надрезанного профиля, основанная на выделении элементарного поперечного сечения листа, а затем численном решении конечно-разностной формы условия статического равновесия для него. После нанесения концентратора напряжений и приложения знакопеременных напряжений в процессе формовки с последующим скручиванием профиля в косовалковой правильной клетки, обеспечивается гарантированное отделение мерной заготовки.

Ключевые слова: гнутый профиль, труба, безотходное разделение, напряженно-деформированное состояние, математическая модель, листогибочная машина.

Введение. В современном производстве гнутых профилей и труб часто используются процессы механической и термической резки [1, 2]. Они сочетаются с такими процессами формообразования, как, например, прокатка, правка, гибка и т.п. Наиболее экономичным процессом при массовом производстве является механическая резка. Гнутые профили применяют практически во всех областях строительства – от армирования металлопластиковых окон, в виде несущих и ограждающих конструкций, до применения их в качестве финишных, отделочных и декоративных элементов. В настоящее время промышленное производство гнутых профилей является необходимым атрибутом всех экономически развитых стран [3].

Анализ последних исследований и литературы. Резка металла на заданные по длине размеры ведется на всех предприятиях, связанных с его производством или переработкой. Будучи неотъемлемой частью производственного процесса, резка металла становится «узким местом», ограничивающим производительность агрегата [4]. Это касается, главным образом, резки металлопродукции большого сечения или профилей, находящихся в движении (резка профилей и труб). Резка движущегося металла известным в производстве методом с применением летучих отрезных устройств характеризуется малой производительностью, наличием стружки, малыми

межремонтными сроками работы уникального оборудования, большими технологическими припусками и другими недостатками [5]. В ряде случаев летучие отрезные устройства, в виду их низкой пропускной способности, являются элементами, ограничивающими производительность основных агрегатов, например, трубоэлектросварочных (ТЭС) и профилегибочных станов (ПГС).

Решения данной проблемы возможно путём использования нового способа разделения гнутых профилей проката заданной длины и формы без искажения его геометрических форм [6]. Способ заключается в предварительном надрезе сдвигом неспрофилированной движущейся ленты ножами специальной конфигурации режущей кромки (рис. 1). Надрез сдвигом осуществляется на глубину, которая меньше глубины, вызывающей трещинообразование. В поперечном сечении неспрофилированной надрезанной заготовки, вдоль линии надреза можно выделить характерные участки, которые соответствуют следующим технологическим операциям (рис. 2):

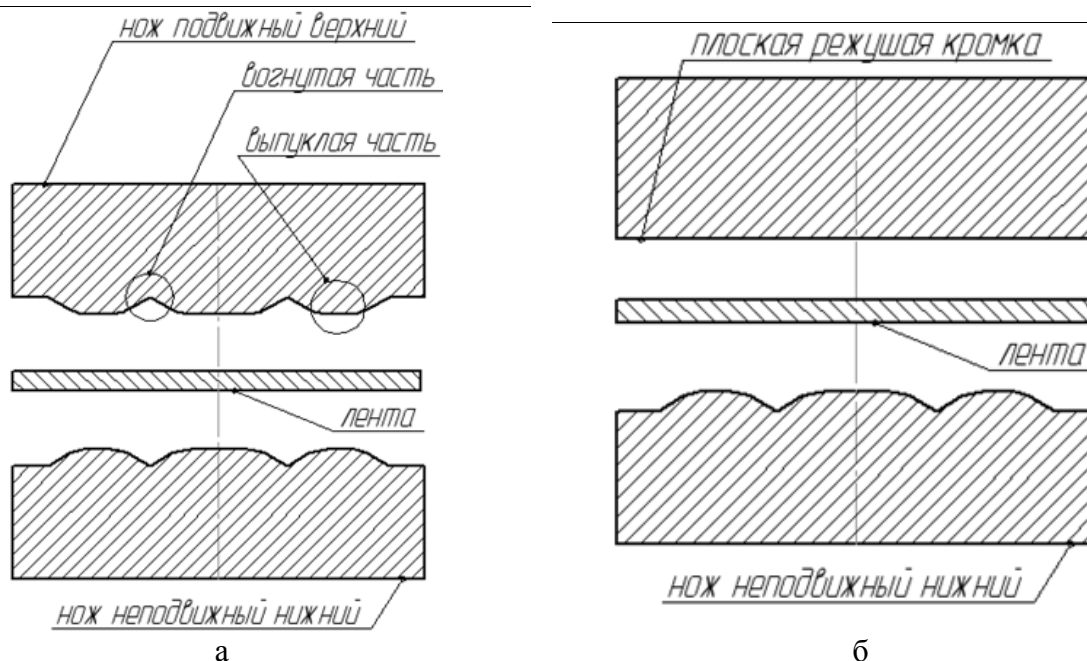


Рис. 1 – Конструктивное исполнение ножей для надреза сдвигом неспрофилированной движущейся ленты: а – с зеркально выполненными режущими кромками; б – плоскими режущими кромками

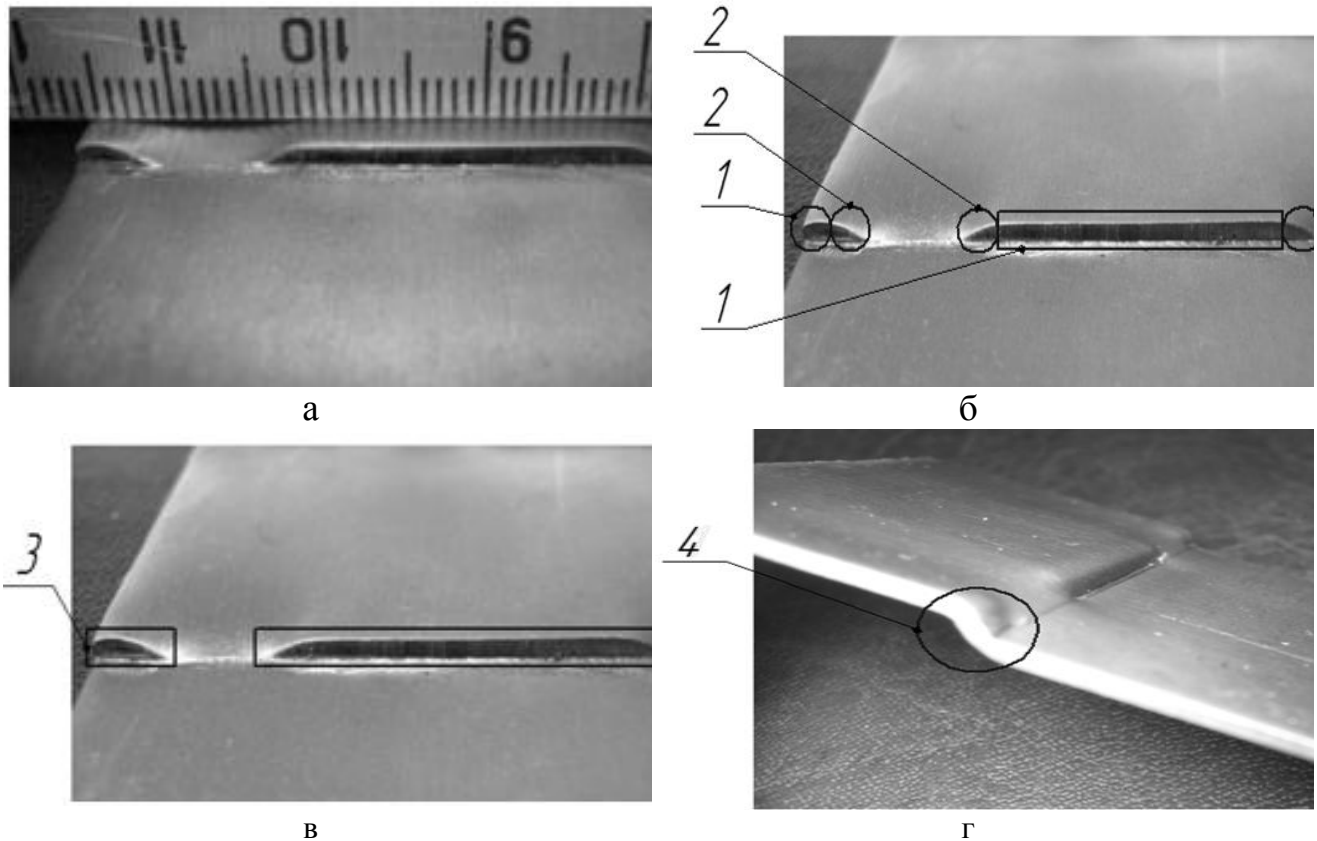


Рис. 2 – Надрезанные заготовки:

а – общий вид; б – фронтальный вид с обозначением участков резки; в – фронтальный вид с обозначением участков формовки; г – вид сбоку с обозначением участка гибки; 1 – участки резки параллельными ножами; 2 – участки резки наклонными или гильотинными ножами; 3 – участки формовки рёбер жесткости; 4 – участки гибки.

После надреза сдвигом ленту выпрямляют с помощью дополнительной пары правильных валков и получают ленту (штрипс) с концентратором напряжений. Из которой профилируют гнутый профиль, в котором концентратор расположен по всему сечению профиля, что предопределяет его разделение по толщине в плоскости концентратора без смятия. Одновременно с надрезкой сдвигом выполняют прорезание части заготовки, которая находится между надрезанными участками на ножах, один из которых имеет соответствующую криволинейную форму.

Для прогнозирования технологических возможностей нового способа разделения профилей и труб в производственных линиях профилегибочных агрегатов методом их оценки напряженно-деформированного состояния материала на всех этапах процесса формовки-разделения, что в настоящее время не выполнено.

Цель исследования, постановка проблемы. Целью настоящей работы является разработка математической модели для расчета напряженно-деформированного состояния материала на первом этапе процесса формовки-разделения, связанным с формированием профиля заданной геометрии с нанесенным концентратором напряжений.

Материалы исследования. В соответствии с изложенным выше была предложена математическая модель напряженно-деформированного состояния металла при реализации изгиба листа, основанная на выделении элементарного поперечного сечения листа, а затем численном решении конечно-разностной формы условия статического равновесия для него. В соответствии с этим, была рассмотрена расчетная схема (рис. 3, а), которая включает в себя исходное состояние заготовки, характеризуемое толщиной h и исходной кривизной $\chi_0 = 1/R_0$, нагруженное состояние с прогибом опорной системы W , радиусом R_1 и кривизной $\chi_1 = 1/R_1$, а также состояние разгрузки, характеризуемое остаточными радиусом $R_{\text{ост}}$ и кривизной $\chi_{\text{ост}} = 1/R_{\text{ост}}$.

С точки зрения напряженно-деформированного состояния, каждый отдельный элементарный объем деформируемого металла может быть охарактеризован продольными составляющими относительных деформаций растяжения-сжатия ε_i , а также соответствующими им нормальными напряжениями σ_i . Так же при разработке математической модели процесса гибки был принят ряд дополнительных допущений, основными из которых являются следующие [7] :

- деформация заготовки двумерная и установившаяся во времени;
- деформации и напряжения, соответствующие растяжению, приняты положительными, а сжатию – отрицательными;
- относительные деформации ε_i и нормальные напряжения σ_i по толщине каждого отдельно выделенного i -го элементарного объема являются величинами постоянными, при этом их количественные оценки соответствуют значениям, определяемым для центра тяжести данного объема;
- значения кривизны χ_0 , χ_1 и $\chi_{\text{ост}}$ рассматривают по отношению к средней линии всего поперечного сечения листа.

Непосредственно математическое моделирование заключается в разбиении поперечного сечения листа на элементарные поперечные сечения с порядковыми номерами $i=1\dots n$ и последующим определением их геометрических характеристик (см. рис. 3, б):

$$\Delta h = h / n; \quad (1)$$

$$y_i = h/2 + \Delta h(i - 0,5); \quad (2)$$

Приняв допущение о соответствии линии упругопластического изгиба дуге окружности, определяем радиус кривизны средней линии (см. рис. 3, а):

$$R_l = St^2 + h \cdot W + W^2 / 2 \cdot W, \quad (3)$$

где St – шаг опорной системы;

W – величина перекрытия.

Количественные оценки относительных деформаций напряжения-сжатия могут быть получены исходя из геометрического решения для изогнутого листа (рис 2.б), имеющего начальную кривизну χ_0 [7].

$$\varepsilon_{y_i} = \frac{(I + \chi_l \cdot y_i) \cdot \varepsilon_{cp} - (\chi_l - \chi_0) \cdot y_i}{I + \chi_0 \cdot y_i}, \quad (4)$$

где ε_{cp} – относительная деформация растяжения линии, соответствующей средней линии листового металла (см. рис. 3, а).

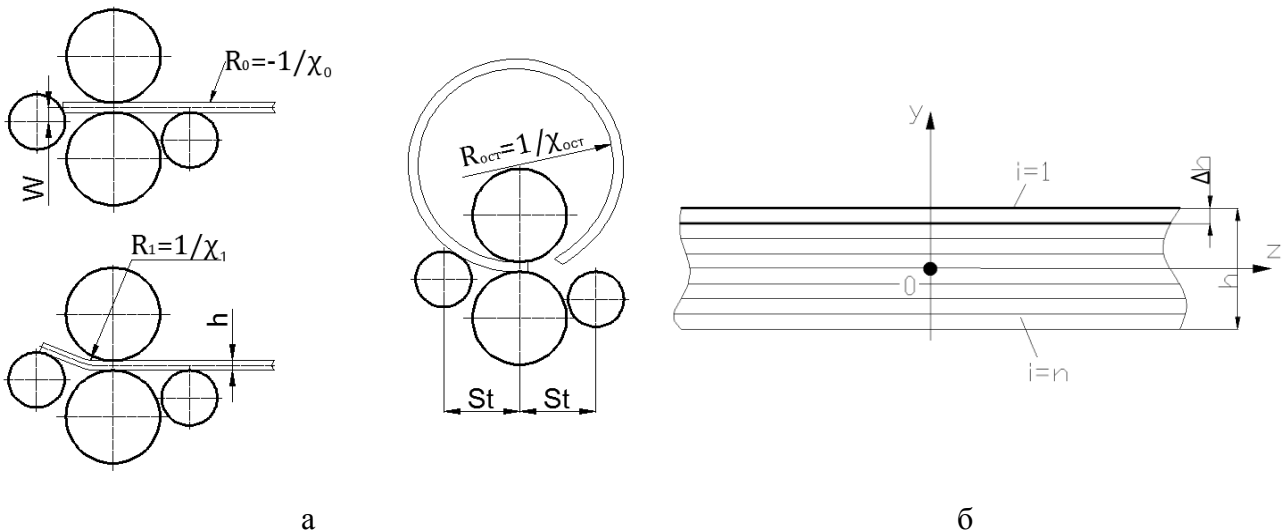


Рис. 3 – Расчетные схемы применительно к численному математическому моделированию напряженно-деформированного состояния металла при реализации изгиба листового металла на листогибочных машинах: а – расчетная схема; б – разбиение поперечного сечения листа

Вместе с тем, с точки зрения процессов холодной обработки металлов давлением, более приемлемым является использование в качестве показателя деформированного состояния не величины относительного обжатия, а интенсивности деформации ε_i , определяемой как [8]

$$\varepsilon_i = (\sqrt{2}/3) \cdot \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}, \quad (4)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – главные линейные деформации.

Главные линейные деформации для плоского деформированного состояния связаны между собой следующими соотношениями: $\varepsilon_1 = -\varepsilon_3 = \ln(l_1/l_0) = \ln(1 + \varepsilon_{y1})$ и $\varepsilon_2 = 0$, где l_0 и l_1 – длина средней линии заготовки в поперечном сечении.

Для дальнейшего решения задавали аналитическую связь между интенсивностью напряжений σ_i и интенсивностью деформаций ε_i . При этом для описания функции $\sigma_i(\varepsilon_i)$ можно использовать аппроксимацию данных источника [8] кубическим

$$\sigma_i = a_0 + a_1 \cdot \varepsilon_i + a_2 \cdot \varepsilon_i^2 + a_3 \cdot \varepsilon_i^3, \quad (5)$$

где a_0, a_1, a_2 и a_3 – значения коэффициентов уравнения регрессии аналитического описания кривой деформационного упрочнения материала.

Остаточную степень деформации $\varepsilon_{ост}$ определяют с учетом известного значения модуля упругости материала E :

$$\varepsilon_{ост_i} = \varepsilon_i - \sigma_i / E. \quad (6)$$

Дальнейший расчет напряженно-деформированного состояния металла при изгибе листового металлопроката проводится на основе конечно-разностного подхода путем численного определения расчетного значения осевой силы T_{y_k} и изгибающего момента M_{y_k} для каждого отдельного элементарного поперечного сечения [7]:

$$T_{y_k} = \sum_{i=1}^n \sigma_i \cdot \Delta h; \quad (7)$$

$$M_{y_k} = \sum_{i=1}^n \sigma_i \cdot y_i \cdot \Delta h, \quad (8)$$

где σ_i – интенсивность напряжений, действующих в рамках каждого отдельного i -го элементарного объема металла листа, подвергаемого правке (см. рис. 3).

Показатели относительной деформации слоя, соответствующего координате центра тяжести рассматриваемого сечения для упругопластической нагрузки $\varepsilon_{ср_k}$ и разгрузки $\chi_{ост(l+k)}$; $\varepsilon_{ост(l+k)}$ определяли на основе дополнительной

итерационной процедуры, аналитическое описание которой имеет следующий вид:

$$\varepsilon_{cpk} = \varepsilon_{cpk} - T_{y_k} / (E_{Mc} \cdot F_s); \quad (9)$$

$$\varepsilon_{ocm(k+1)} = \varepsilon_i - \sigma_i / E; \quad (10)$$

$$\chi_{ocm(k+1)} = \chi_{ocmk} - M_{y_k} / (E_{Mc} \cdot J_s), \quad (11)$$

где k – порядковый номер очередного цикла итерационной процедуры решения;

F_s, J_s – площадь и момент инерции поперечного сечения листового металла.

Для оценки степени сходимости итерационных процедур решения (9) – (11) использовали следующее условие:

$$\delta_k = |T_{y_k} / h| + |M_{y_k} / h^2| \leq 0,01. \quad (12)$$

Дальнейший отрыв круглых профилей происходит на участке косовалковой трубоправильной машины с индивидуальным приводом роликов путем мгновенной остановки последних по ходу движения профиля роликов трубоправильной машины и разрыве по местам надреза.

Выводы. Разработана математическая модель напряженно-деформированного состояния металла на первом этапе процесса формовки-разделения, связанным с формированием профиля заданной геометрии с нанесенным концентратором напряжений при формовке, позволяющая прогнозировать технологические возможности нового способа разделения профилей и труб в производственных линиях профилегибочных агрегатов методом их оценки напряженно-деформированного состояния материала.

Список литературы: 1. Грудев А. П. Технология прокатного производства : учебник для ВУЗов / А. П. Грудев, Л. Ф. Машкин, М. И. Ханин. – М. : Металлургия, 1994. – 656 с. 2. Николаев В. О. Технологія виробництва сортового та листового прокату : підручник / В. О. Ніколаєв, В. Л. Мазур. – Запоріжжя : ЗДІА, 2000. – 257 с. 3. Технология прокатного производства. В 2 к. К. 2 : справочник / М. А. Беньковский, К. Н. Богоявленский, А. Н. Виткин [и др.]. – М. : Металлургия, 1991. – 423 с. 4. Соловцов С. С. Безотходная резка сортового проката в штампах / С. С. Соловцов. – М.: Машиностроение, 1985. – 175 с. 5. Веселовский С. Н. Резка материалов./ С. Н. Веселовский. –М. : Машиностроение, 1973. -360с. 6. Пат. 70085U Україна МПК (2012.01) В 23 D 23/00. Спосіб поділу гнутих профілів прокату / М. О. Лісовий, К. К. Діамантопуло. – № u201113655; заявл. 21.11.2012; опубл. 25.05.2012, Бюл. №10. – 4с.; 5 іл. 7. Дунаевский В. И. Одномерное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при правке растяжением с изгибом / В. А. Самойлов, А. В. Сатонин, А. Б. Егоров // Изв. вузов Черная металлургия. – 1994. – №9. – С. 44-47. 8. Сторожев М. В. Теория обработки металлов давлением : учебник для вузов / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1977. – 423 с.

Поступила в редколлегию 23.05.2014

УДК 621.77

В. Н. ЛЕВЧЕНКО, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ»;
И. В. ГАЛАСЬ, магистрант, НТУ «ХПІ».

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОМБИНИРОВАННОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ

Проведено численное моделирование процесса комбинированного выдавливания, дополнительно проведены расчеты процессов прямого и обратного выдавливания. На основе энергетического метода разработана математическая модель процесса комбинированного выдавливания, позволяющая определить энергосиловые параметры процесса как функции от основных параметров. Разработанная математическая модель реализована в математическом пакете SKYLAB и в виде программного продукта (подсистемы САПР) в среде Visual Basic.

Ключевые слова: выдавливание комбинированное, модель математическая, параметры энергосиловые.

Введение. По мере развития современного производства и расширения номенклатуры изделий все большую актуальность приобретают проблемы разработки и внедрения малоотходных технологий.

К таким технологиям можно отнести процессы холодной объемной штамповки (ХОШ) и в частности изготовление деталей класса втулок методом комбинированного выдавливания. К деталям данного класса (рис. 1) относятся собственно втулки, гильзы, стаканы, вкладыши, т.е. детали, образованные наружными и внутренними поверхностями вращения, имеющие общую прямолинейную ось. Некоторые основные виды подшипниковых втулок служат как опоры вращающихся валов. Наиболее часто применяют втулки с $L/D \geq 3$.



Рис. 1 – Детали типа втулок

Перспективным направлением развития современного производства металлических изделий в машино- и приборостроении является применение ресурсосберегающих технологических процессов, повышающих производительность труда и качество продукции. Этим требованиям в полной

мере удовлетворяют процессы объемной штамповки штучных заготовок, полученных малоотходными способами разделительных операций. Однако, в отличие от хорошо изученных процессов листовой штамповки, до сих пор не существует алгоритма, руководствуясь которым можно назначить оптимальные технологические параметры, обеспечить требуемое формоизменение, а также приемлемую для производства прочность и стойкость рабочего инструмента. В большинстве случаев разработка технологии с использованием того или иного вида выдавливания представляет уникальный в своём роде процесс, результаты коего во многом зависят от квалификации технолога. Традиционные методы проектирования, отладки и освоения технологии предусматривают проверку множества вариантов с использованием метода «проб и ошибок». При этом каждый вариант требует экспериментальной проверки, а значит, изготовления нового инструмента, штампа или даже модернизации штампового оборудования, что приводит к дополнительным затратам времени и средств. Экономическая нецелесообразность такого подхода наиболее очевидна в случае изготовления небольшой партии деталей, когда затраты на отработку технологии сделают производство не рентабельным. Конкурентоспособной в современных условиях является только мобильная технология, которую можно быстро и оптимально перестроить под изменяющиеся параметры формы и материала штампуемых деталей. Для интенсификации процесса разработки технологических операций объёмной штамповки необходима информация о напряжённно-деформированном состоянии (НДС) материала заготовки, полуфабриката (детали), а также сведения об откликах системы штамп – инструмент – деформируемый образец на изменение технологических параметров. Для получения соответствующей информации могут быть использованы методы экспериментального исследования и теоретического моделирования, а также их комбинация.

Однако применение таких экспериментальных методов исследования НДС, как метод делительных сеток, моделирования на многослойном материале, метод твёрдости, метод микроструктурных измерений к процессам объёмной штамповки с большой величиной деформации в очаге сопряжено с определёнными трудностями. Методы делительных сеток, моделирования на многослойном материале и микроструктурных измерений требуют однородного и монотонного протекания деформации. В процессах объёмной штамповки в значительной части заготовки деформация неоднородна и

немонотонна. Кроме того, при использовании метода делительной сетки для исследования НДС необходимо изготавливать разъёмные образцы, испытывающие сжимающие напряжения в плоскости разъёма. Для метода микроструктурных измерений необходимо подготовить равноосную структуру материала деформируемого образца до деформации. Использование метода твёрдости при большой величине деформации ограничено тем, что кривые зависимостей имеют, так называемый участок насыщения, на котором небольшому изменению величины показателя твёрдости соответствует значительное изменение интенсивности напряжений и деформации. При большой величине деформации результаты, полученные с помощью метода твёрдости, будут неполными и малодостоверными.

Альтернативой экспериментальному исследованию и теоретическому анализу является использование имитационного моделирования процессов объёмной штамповки с помощью метода конечных элементов (МКЭ) [1, 2].

Постановка задачи исследования. Для проверки адекватности математической модели, положенной в основу подсистемы САПР ХОШ деталей типа втулки, провести численные эксперименты с использованием метода конечных элементов и сравнить полученные результаты.

В основу МКЭ положено разбиение сплошной среды (в частности объёма деформируемого тела) на множество простых геометрических элементов (плоские элементы: прямолинейные и криволинейные, правильные и произвольные треугольники и четырёхугольники; объёмные элементы: прямолинейные и криволинейные четырёхгранники и шестигранники). Элементам в целом и каждому узлу в частности придают определённые степени свободы, а каждый элемент обладает свойствами материала дискретизированной среды.

При применении МКЭ точность полученных результатов напрямую зависит от выбранных значений базы элемента и шага по времени. Для решения задач ОМД с помощью МКЭ выбор базы элемента и величины шага по времени зависит от поставленной задачи. Если преследуется цель получения общей картины формоизменения металла в процессе ОМД, то эти два параметра можно устанавливать максимально возможными, насколько это позволяют сделать особенности геометрии инструмента и заготовки (в этом случае время решения существенно уменьшается за счет снижения точности решения). Но для получения точной картины формоизменения металла и информации по

основным параметрам ОМД базу элемента и шаг необходимо выбирать минимально возможными (в этом случае расчетное время возрастает за счет повышения точности решения).

Применение МКЭ при исследовании процесса выдавливания позволяет рассчитать большое число вариантов. Кроме того, отладка технологии на компьютере позволяет избежать материальных и временных затрат на изготовление натурной технологической оснастки и доводки технологии, а в ряде случаев отказаться от применения ошибочного или неэффективного технологического процесса.

В настоящее время существует достаточно много специализированных и общеинженерных пакетов (программных комплексов) конечноэлементного анализа. Более простые в использовании пакеты, такие как FastForm, DaуnaForm, специально адаптированы к процессам холодной штамповки. Расчёт процесса формоизменения при выдавливании с большими деформациями требует, как правило, использования специализированных программ, например, *AutoForm*, *Qform*, *Deform 3D*. Основной сложностью при применении пакетов, использующих МКЭ – анализ, является постановка задачи адекватная физической природе исследуемого процесса. Это положение в полной мере относится и к исследованию пластической деформации, в том числе и процессу выдавливания. Необходимым условием эффективного применения ПК для расчета технологических процессов ОМД является требование корректности результатов компьютерного моделирования процессов, адекватности их реальному процессу.

Математический эксперимент процесса комбинированного выдавливания выполняли методом конечных элементов с использованием пакета Deform-3D. Данный пакет позволяют моделировать широкий спектр процессов обработки давлением, имеет дружелюбный пользовательский интерфейс и хорошо зарекомендовал себя на практике.

Считали, что деформации пуансона и матрицы по сравнению с деформациями заготовки пренебрежимо малы, поэтому они моделируются как жёсткие тела. Контактное взаимодействие заготовки с рабочими инструментами моделируется кинематическим условием непроникновения, условием равенства нормальных сил на контактных поверхностях штампа и заготовки, касательным напряжением, обусловленным трением между контактирующими телами. В ходе отработки задачи при появлении зон

затруднённого деформирования металла программа в автоматическом режиме перестраивала сетку конечных элементов.

Для выдавливания использовали штучную заготовку с размерами: высота $h=50$ мм, диаметр $d=50$ мм. Материал заготовки – сталь 40. Выдавливание производилось нахолодно. Рабочий инструмент (матрица и пуансон) имел постоянную температуру, равную 20°C . Сетка конечных элементов для них не строилась. В качестве оборудования, при моделировании, использовался гидропресс.

Исходные данные, необходимые для моделирования данного процесса занесены в табл. 1. Моделирование процесса проводилось в 5 этапов:

1. Геометрическое моделирование заготовки (рис. 2) и инструмента в системе ProEngineer.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета

Процесс	Комбинированное выдавливание
Размеры заготовки	$d = 50$ мм, $h = 50$ мм, $h/d=1$
Материал заготовки	Сталь 40
Температура начала выдавливания	20°C
Температура рабочих инструментов	20°C
Коэффициент трения	0,2

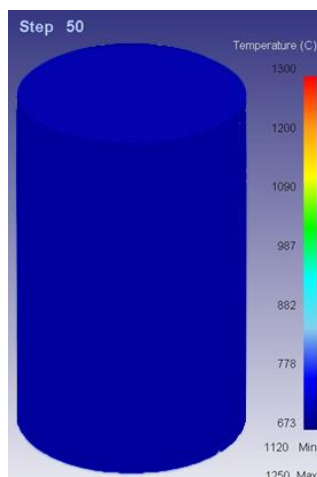


Рис. 2 – Исходная заготовка

2. Исходное положение заготовки и рабочего инструмента (матрицы и пуансона) показаны на рис. 3.

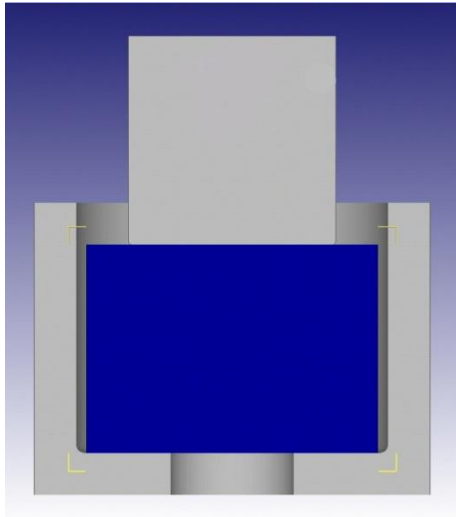


Рис. 3 – Исходное положение заготовки и рабочего инструмента

3. Разбивка заготовки на конечные элементы (генерация сетки) (рис. 4).

4. Выбор шага расчетов. Для проведения математического эксперимента был выбран шаг 3 мм, с сохранением каждого 5 шага операции.

5. Собственно расчет процесса комбинированного выдавливания (рис. 5). Расчет останавливался, когда пуансон и матрица находились на расстоянии 30 мм друг от друга.

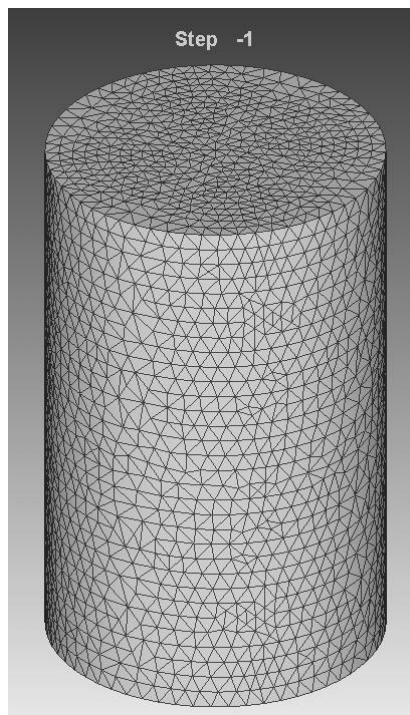


Рис. 4 – Генерация сетки

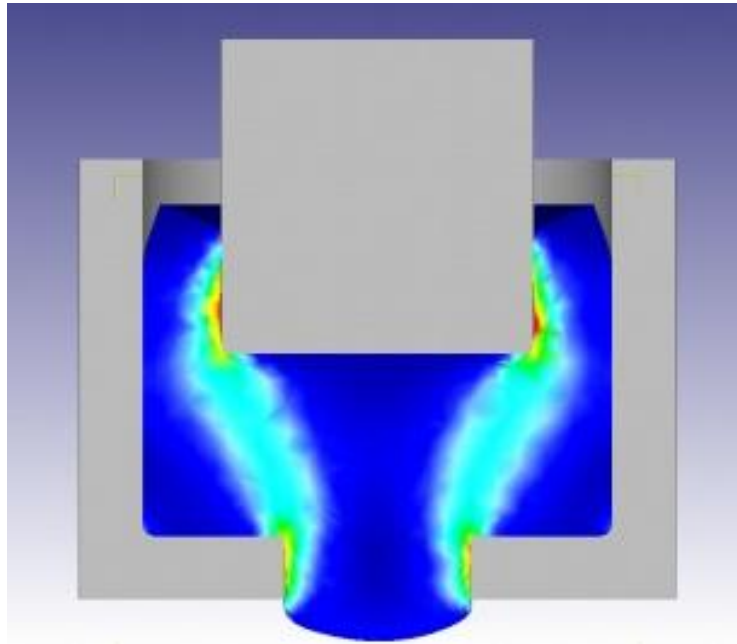


Рис. 5 – Процесс комбинированного выдавливания

На рис. 6 показаны напряжения и деформации в деформируемой заготовке при комбинированном выдавливании, полученные в результате моделирования в пакете Deform 3D.

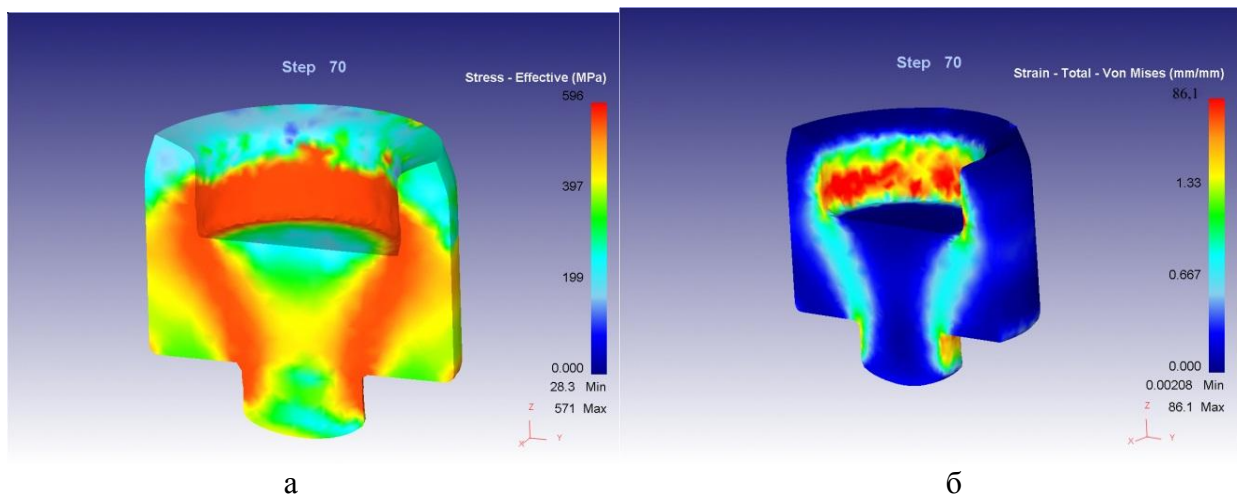


Рис. 6 – Распределения напряжений и интенсивности деформаций на конечной стадии выдавливания: а – распределение напряжений; б – интенсивности деформаций

Распределение напряжений по телу заготовки показаны на рис. 6, а. Высокая нагрузка появляется в местах контакта поверхностей заготовки с режущей кромкой рабочих инструментов.

Интенсивность деформаций при этом (рис. 6, б) не превышает 8,6.

В процессе выполнения работы была разработана математическая модель для комбинированного выдавливания энергетическим методом. Так как

расчеты произведены в общем виде, модель работает как для комбинированного, так и для прямого и обратного выдавливания. Для этих же схем также были проведены расчеты с помощью в пакете Deform 3D.

Моделирование процесса проводилось в 5 этапов:

1. Геометрическое моделирование заготовки и инструмента в системе ProEngineer.
2. Задание исходного положения заготовки и рабочего инструмента (матрицы и пуансона) для прямого и обратного выдавливания (рис. 7).

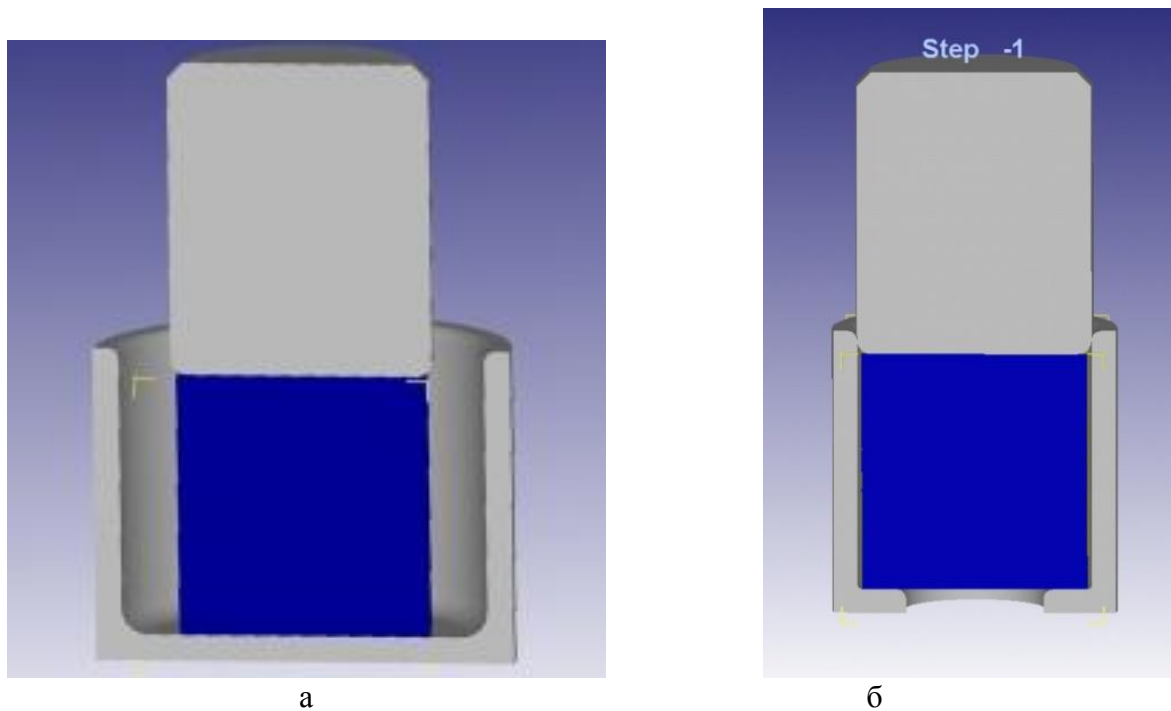


Рис. 7 – Исходное положение заготовки и рабочего инструмента:
а – обратное выдавливание; б – прямое выдавливание

3. Разбивка заготовки на конечные элементы (генерация сетки).
4. Выбор шага расчетов. Для проведения математического эксперимента был выбран шаг 3 мм, с сохранением каждого 5 шага операции.
5. Процесс моделирования прямого и обратного выдавливания (рис. 8). Расчет останавливался, когда пуансон и матрица находились на расстоянии 10 мм друг от друга при обратном выдавливании и на расстоянии 25 мм при прямом.

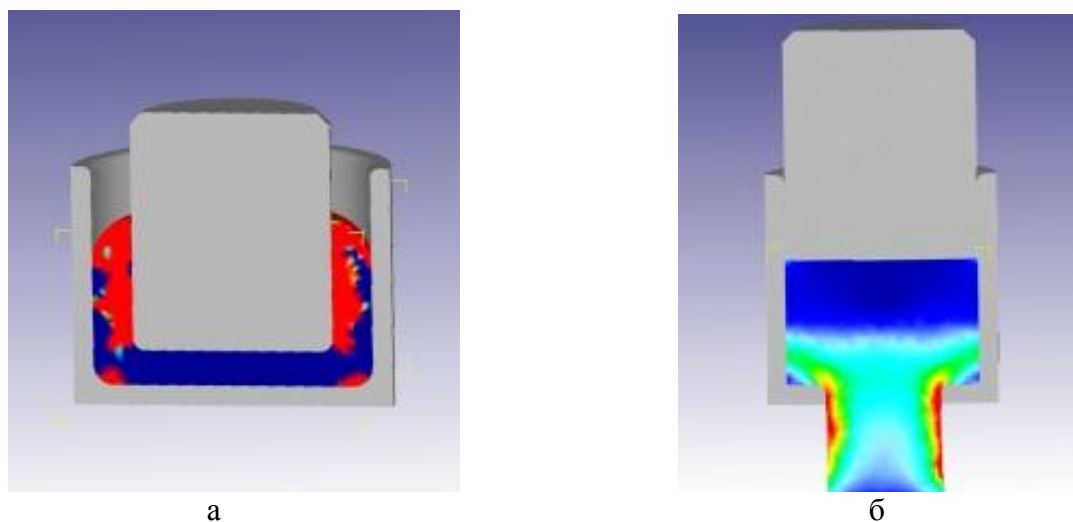


Рис. 8 – Процессы прямого и обратного выдавливания: а – процесс обратного выдавливания; б – процесс прямого выдавливания

На рис. 9 показаны распределения напряжений и деформаций в заготовке при обратном выдавливании.

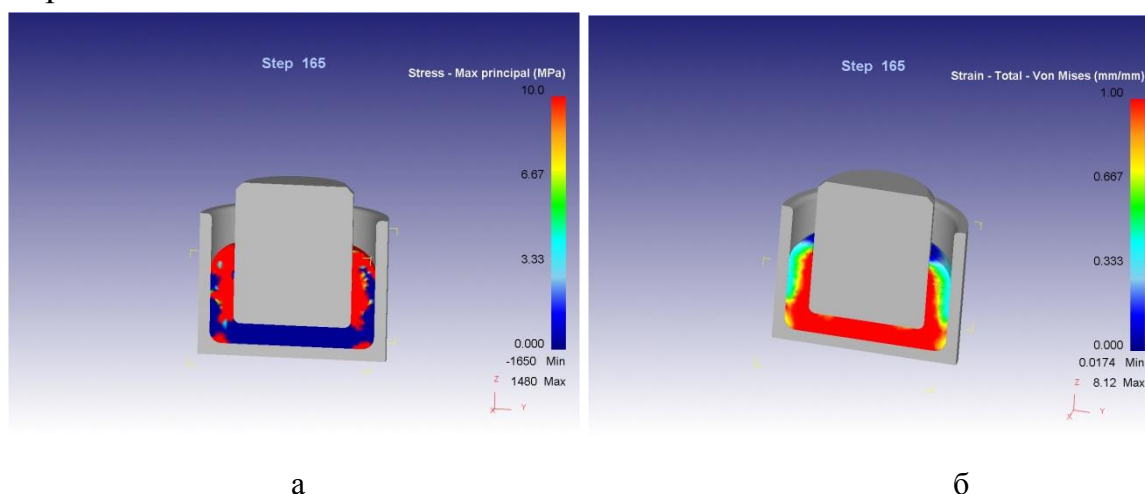


Рис. 9 – Распределения напряжений и интенсивности деформаций на конечной стадии выдавливания: а – процесс обратного выдавливания; б – процесс прямого выдавливания

Распределение напряжений по сечению заготовки показаны на рис. 9, а. Высокая нагрузка появляется в местах контакта поверхностей заготовки с режущей кромкой рабочих инструментов.

Интенсивность деформаций при этом (рис. 9) не превышает 8,12.

На рис. 10 показаны распределения напряжения и деформаций в заготовке при прямом выдавливании.

Распределение напряжений по сечению заготовки показаны на рис. 10, а.

Интенсивность деформаций при этом (рис. 10, б) не превышает 5,45. Результаты моделирования энергетическим методом и моделирования МКЭ

приведены в табл. 2. После проведенного анализа, видим, что максимальное усилие получаемое при обратном выдавливании превышает значение max усилия при прямом в 1,61 раз. А значение усилия при комбинированном выдавливании – в 2,6 раза. По этому, можно сделать вывод, что комбинированное выдавливание является оптимальным процессом холодной объемной штамповки для изготовления деталей класса втулок и имеет наименьшее максимальное усилие. Расхождение значений, полученных энергетическим методом и методом конечных элементов, колеблются в пределах 5-8%.

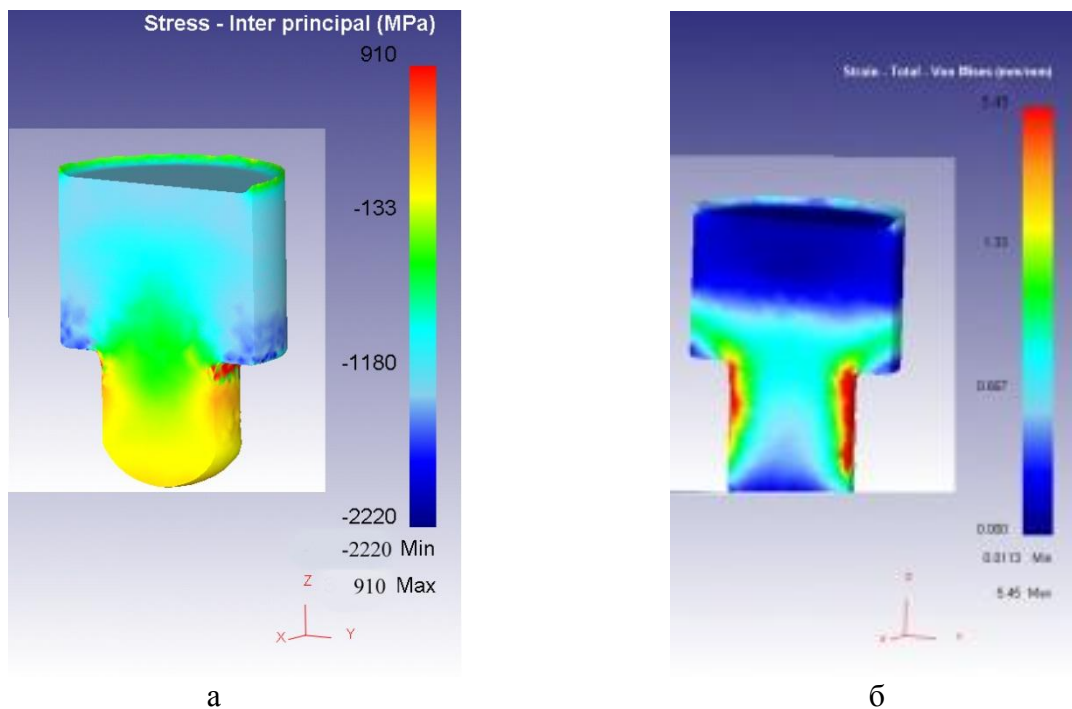


Рис. 10 – Распределения напряжений и интенсивности деформаций на конечной стадии выдавливания: а – процесс обратного выдавливания; б – процесс прямого выдавливания

Таблица 2 – Результаты математического эксперимента и математического моделирования

	Комбинированное выдавливание	Прямое выдавливание	Обратное выдавливание
Энергетический метод (усилие, МПа)	609	965	1554
МКЭ (усилие, МПа)	571	910	1480

Выводы:

1. Для проверки адекватности математической модели, построенной с использованием энергетического метода с использованием метода конечных элементов проведено численное моделирование процесса комбинированного

выдавливания, дополнительно проведены расчеты процессов прямого и обратного выдавливания.

2. Получены распределения напряжений и деформаций для этих процессов. Показано, что минимальное усилие соответствует процессу двумя степенями свободы течения металла. 3 Расчетные значения усилий деформирования, полученные в результате математического моделирования энергетическим методом, имеют погрешность 5-8% по сравнению с результатами, полученных при расчете МКЭ.

Список литературы: 1. Иванов К. М., Лясников А. В., Гуменюк Ю. И., Матвеев С. А. Исследование технологических возможностей поперечного выдавливания методом конечных элементов // Металлообработка.-2001.-№2. 2. Иванов К. М., Шевченко В. С., Юргенсон Э. Е. Метод конечных элементов в технологических задачах ОМД: Учебное пособие. С-Пб: Институт Машиностроения, 2000.

Поступила в редколлегию 03.04.2014

УДК 621.7.073.004

В. К. ЛОБАНОВ, докт. техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»;

Г. И. ПАШКОВА, канд. техн. наук, нач. лаборатории, ГП «Завод имени В.А. Малышева», Харьков.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ШТАМПОВКИ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ОБЖИМОМ

Изложены технологические особенности процесса горячей штамповки с последующим обжимом, конструкции и материалы рабочих частей штамповой оснастки, разработан классификатор поковок, рекомендуемых для штамповки с последующим обжимом. Установлено, что штамповка с последующим обжимом, характеризующаяся повышенными показателями по эффективности использования металла и качества материала поковок, рекомендуется для широкого применения при производстве предложенных групп поковок.

Ключевые слова: горячая штамповка, обжим, матрица, внеконтактная деформация

Введение. Одним из направлений совершенствования кузнечного производства является освоение прогрессивных технологических процессов штамповки на универсальном оборудовании, обеспечивающих изготовление поковок с минимальным расходом металла и высокой производительностью.

Известна высокая эффективность штамповки с последующим обжимом пустотелых осесимметричных заготовок [1]. В настоящее время такие технологические процессы освоены и внедряются на ряде предприятий.

Однако при разработке технологии штамповки некоторые параметры (высота промежуточной поковки, профиль рабочей части матрицы, диаметр

калибрующего пояса и др.) выбирают на основе инженерной интуиции, что затрудняет и удлиняет сроки освоения процессов.

Ввиду многообразия форм поковок, получаемых в результате осуществления процессов штамповки с последующим обжимом, выбор оптимальных параметров процесса рационально производить в рамках определенной конструктивной общности деталей – групп объективного их классификатора.

Анализ последних исследований и литературы. Известен классификатор поковок, рекомендуемых к изготовлению штамповкой с последующим обжимом [2]. Однако он охватывает лишь часть показателей и не позволяет увидеть конструктивное сходство и различие между поковками, вскрыть общие закономерности, присущие отдельным классификационным группам, исключить элементы субъективизма в проектировании поковок и штамповой оснастки, упорядочить и сократить неоправданное разнообразие поковок и поэтому не может претендовать на полную объективность.

Построение классификатора должно быть выполнено на основе общепринятых принципов, важнейшими из которых являются достаточная полнота охвата, единство классификационного признака на каждом уровне членения и непересекаемость разделов классификации [3].

Наличие классификатора позволит установить конструктивные особенности штамповой оснастки, схемы технологических переходов штамповки для каждой классификационной группы деталей, обладающих в данных производственных условиях укрупненной общностью технологического процесса, оборудования и штампов.

Цель исследования. Целью настоящей работы являлся разработка частной классификации поковок, рекомендуемых к изготовлению штамповкой с последующим обжимом, построенной по конструктивно-технологическим признакам.

Материалы исследований. Положительный опыт внедрения в производство процессов штамповки с последующим обжимом показывает, что наличие на деталях впадин, проточек, внутренних выступов и отверстий в перемычках практически не оказывает влияния на принципы конструирования поковок и технологических процессов.

К основным признакам классификации отнесены конструктивный тип поковок, габариты поковок, сходство по элементам наружных и внутренних поверхностей (табл.).

Таблица 1. Классификация поковок, штампуемых с последующим обжимом

Тип: пустотелые осесимметричные поковки		Классификация поковок				
		Группа	Подгруппа	Внутренняя поверхность	Эскиз поковки	Характерные соотношения размеров
Наружная поверхность	Гладкая	1	11	С гладким, ступенчатым, глухим или сквозным отверстием		$H \geq 2,0S_M$ $h_B \geq 1,5S_M$ $0,05 \leq \frac{S_M}{D} \leq 0,3$ $D \leq 250 \div 300$ мм
			12	Образована сочетанием геометрических тел		$H \geq 2,0S$ $h_B \geq 1,5S$ $0,05 \leq \frac{S}{D} \leq 0,3$ $h_n < h(2)$
			13	С гладким глухим или сквозным отверстием		$D \geq 250 \div 300$ мм $0,05 \leq \frac{S}{D} \leq 0,3$ $\frac{H}{D} \geq 0,25$ $h_n < h(2)$
			14	Со сквозным ступенчатым отверстием		$0,075 \leq \frac{H}{D} \leq 0,2$ $0,05 \leq \frac{S}{D} \leq 0,15$ $H \geq 1,5S$ $h_B \geq S$ $D \geq 150 \div 200$ мм
	Односторонняя одноступенчатая	2	21	С гладким, ступенчатым, глухим или сквозным отверстием		$0,05S_\phi \leq h_\phi \leq 0,8H$ $\frac{S_\phi}{D} \leq 0,3$ $h_B \geq S_\phi$ $H - h_\phi \leq 2\sqrt{RS}$
	Двухсторонняя ступенчатая	3	31	С гладким, ступенчатым, глухим или сквозным отверстием		$H \geq 2,5S_M$ $h_K \leq 1,5S_M$ $0,05 \leq \frac{S_M}{D} \leq 0,3$ $h_B \geq S_M$ $\beta \leq 8 \div 10^\circ$
	Сферическая	4	41	С гладким глухим отверстием		$h_K \leq (1,25 \div 1,5)(D - d)$ $0,05 \leq \frac{D-d}{2D} \leq 0,3$ $\beta \leq 8 \div 10^\circ$

Наружная поверхность поковки, примыкающая к плоскости разъема, отнесена к основной. Внутренние поверхности поковок, образуемые знаками штампов, отнесены к дополнительным. При разработке классификатора в первую очередь выявлены группы практически осуществимых и целесообразных разновидностей поковок.

Классификация позволила провести целенаправленную разработку технологических штампов, экспериментальные и теоретические исследования, опытную штамповку для установления рекомендаций по проектированию.

В соответствии с классификацией поковки, штампуемые с последующим обжимом, разделены на 4 группы. К первой группе отнесены поковки с гладкой боковой поверхностью, среди которых дополнительно выделены 4 подгруппы.

В первую подгруппу включены поковки диаметром до 250-300 мм с гладким, ступенчатым глухим или сквозным отверстием типа колец, втулок, шлицевых муфт и т. п. Для получения кондиционных поковок этой подгруппы высота промежуточной поковки выполняется на 1,5-2 % меньше, по сравнению со штампуемой по типовой технологии. Относительная толщина поковок ($\frac{S_m}{D}$)

ограничивается пределами 0,05-0,3. При $\frac{S_m}{D} < 0,05$ наблюдается пластическая потеря устойчивости полой части поковки при обрезке облоя в виде наружного кольцевого выпучивания. С увеличением $\frac{S_m}{D}$ свыше 0,3 металл практически не течет в радиальном направлении, наблюдается увеличение высоты поковки без уменьшения диаметра отверстия.

Для обжима поковок относительной высотой $\frac{H}{D} \leq 0,5$ рекомендуются штампы с конической формой матричной воронки. Угол наклона образующей конической поверхности матрицы α выбирается в зависимости от относительной толщины поковки в пределах 8-15° [4].

При штамповке поковок из сталей перлитного класса матрицы изготавливаются из стали 5ХНМ, для обработки сталей аустенитного и мартенситного классов в качестве штампового материала рекомендуется высокопрочный чугун или применение наплавов типа Т620.

С целью предотвращения образования на поковках раструба, вследствие внеконтактной деформации заготовки после выхода из матричной воронки, диаметр калибрующего пояска увеличивают на величину

$$\Delta d = \frac{H}{\left(r_{cp} - \frac{S}{2}\right) \cdot \sin \alpha} \sqrt{d_3 \cdot S \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}, \quad (1)$$

где H – высота поковки;

r_{cp} – среднее значение радиуса участка свободного изгиба;

S – толщина стенки;

d_3 – диаметр срединной поверхности поковки;

α – угол образующей конической матрицы с осью симметрии.

На поковках со стороны пуансона образуется практически недеформированный в матрице поясок высотой

$$h = \frac{\Delta d}{2 \cdot \operatorname{tg} \beta}, \quad (2)$$

где β – штамповочный уклон.

В этой зоне располагают перемычку под прошивку отверстия, диаметр которого не уменьшается в процессе обжима. В результате успешно применяются совмещенные штампы для обрезки облоя, прошивки отверстия и обжима поковок.

При штамповке высоких поковок первой подгруппы, у которых $\frac{H}{D} > 0,5$, конические матрицы с увеличенным диаметром калибрующего пояска не обеспечивают получение бездефектных поковок. При нормальном припуске на обжатом торце поковки появляются черноты в отверстии около перемычки под прошивку. Поэтому при штамповке таких поковок применяют матрицы с выпуклым профилем образующей рабочей поверхности, обеспечивающие получение поковок с незначительной корсетностью.

Ко второй подгруппе отнесены поковки, состоящие из обода, дисковой части со ступицей или без нее. Это поковки шестерен, стаканов, сервопоршней и т.п. деталей, изготавливаемых в основном из цементуемых сталей. Дисковая часть деталей, штампуемых по такой технологии, может быть смещена относительно торца не более h (2). Несоблюдение этого условия приводит к выпучиванию диска поковки в процессе обжима. Штамповочный ручей

молотового штампа по ободу выполняють с равными наружным и внутренним штамповочными уклонами (6-7°). Промежуточные поковки штампуют, тщательно центрируя осаженную заготовку в ручье, обеспечивая минимальный выход металла в облой. При значительном облое в процессе обжима иногда наблюдается расслоение металла поковки по наружному контуру в плоскости разреза штампов. В обрезной штамп промежуточную поковку укладывают дисковой частью в сторону пуансона.

Третья подгруппа – поковки барабанов, шестерен и т. п. деталей, изготавливаемых на тяжелых молотах. При штамповке промежуточных поковок этой подгруппы на типовых штампах наносится большое количество (до 40) ударов. Происходит обратное выдавливание, характеризующееся односторонним течением металла. При этом сплошная заготовка вытесняется в зазор, образованный параллельными коническими стенками штамповочного ручья. В результате имеет место повышенный брак поковок по незаполнению, стойкость молотовых штампов не удовлетворяет требованиям производства.

Положительные результаты получены при применении штамповочных ручьев, в которых металл течет вверх в расширяющейся полости, что достигается увеличением наружного штамповочного уклона по сравнению с внутренним на 1-2° [5].

Четвертая подгруппа – поковки небольшой относительной высоты ($0,075 \leq \frac{H}{D} \leq 0,2$) со сквозным ступенчатым отверстием. Для сокращения потерь металла на перемычку прошитого отверстия поковки этой подгруппы штампуют из кольцевых заготовок. Размещение замка молотового штампа внутри штамповочного ручья снижает расход штамповой стали. На изменение толщины и формы штампуемых поковок существенно влияет деформация края промежуточной поковки. При относительной толщине $\frac{S}{D} > 0,15$ наблюдается смятие и сдвиговые деформации наружной кромки поковки в начальной стадии процесса деформирования, что приводит к уменьшению толщины края на последующих этапах обжатия. Бездефектные поковки этой подгруппы штампуют, используя матрицы с углом наклона образующей конической поверхности 5–6°.

Ко второй группе отнесены поковки типа стаканов, бустеров, концевых бандажей и т.п. деталей с фланцами. Практически установлено, что

рекомендуемая РТМ [2] схема штамповки поковок этой группы с последующим обжимом путем вдавливания ступичной части в цилиндрическую матрицу ступенчатым пуансоном не обеспечивает получения бездефектных деталей. На поковках под фланцем выявляются складки металла, диаметр фланца и отверстие в нем в процессе обжима ступицы практически не уменьшаются. В результате поковки не получают требуемых формы и размеров.

Тщательной отработкой технологии непосредственно в производственных условиях показано, что поковки этой группы можно штамповать с последующим обжимом, если радиальные сжимающие напряжения прилагаются к фланцу. Промежуточная поковка в этом случае укладывается в обрезной штамп фланцем на матрицу. При выполнении в поковке сквозного отверстия прошивку производят на заключительной стадии процесса обжима. Экспериментально установлено, что для перевода в пластическое состояние в процессе обжима всего сечения фланца его высота должна быть не менее половины толщины. В противном случае отмечается локализация деформации в периферийных объемах фланца, контактирующих с матрицей, и местное увеличение его высоты. Высота ступичной части поковок, штампуемых по такой технологической схеме, не превышает протяженности радиуса естественного изгиба в направлении оси [6]

$$(H-h_{\phi}) \leq 2 \cdot \sqrt{R \cdot S}, \quad (3)$$

где R – радиус срединной поверхности ступицы.

Толщина S должна удовлетворять условию пластической устойчивости ступичной части поковки под действием усилия обжима.

Третья группа – поковки с двухсторонней ступенчатой наружной поверхностью типа сепараторов, сателлитов, бандажей и т. п. деталей. В технологическом отношении они наиболее сложны, особенно с точки зрения выполнения выступа на торце, находящемся в процессе обжима со стороны противоположной пуансону. При расположении выступа в средней части по толщине стенки, а также примыкающим к внутренней поверхности поковки, в процессе обжима происходит интенсивная внеконтактная деформация утоненной части стенки в сторону увеличения диаметра отверстия. Для получения бездефектных поковок торцовый выступ, деформирующийся без контакта с инструментом, выполняют в виде конуса с углом наклона образующей к оси 8–10°. Выход поковки из калибрующего пояса матрицы в

процессе выполнения операции обжима ограничивают половиной протяженности радиуса естественного изгиба стенки поковки в направлении оси штампа [7].

К четвертой группе отнесены поковки со сферической наружной поверхностью типа шаровых опор, шаровых пальцев и т. п. деталей. Особенность технологии производства поволок этой группы заключается в том, что на первом переходе штамповки на заготовке высаживается головка диаметром 0,6-0,7 диаметра поковки. Центрирование заготовки в штамповочном ручье производится по хвостовику. Второй переход – окончательный. Промежуточная поковка укладывается облоем на матрицу обрезного штампа хвостовиком к пуансону. Обжим поковки выполняется в штампе с вогнутым профилем рабочей части матрицы. Получение поволок требуемых форм и размеров обеспечивается настройкой закрытой высоты штампа. Поковка извлекается из штампа с помощью системы тяг и скоб с приводом от ползуна прессы.

Для обоснования выбора размеров промежуточной поковки и назначения допусков на поковки, штампуемые по такой технологии, исследовали влияние операции обжима на высоту, изменение толщины стенки и разнотолщинность получаемых поволоков.

На развитие разностенности в процессе обжима оказывают влияние неравномерность температурного поля и нестабильность коэффициента трения, приводящие к различной интенсивности утолщения стенки поковки в широтном сечении.

Изготавливали поковки диаметром от 118 до 458 мм из аустенитных сталей 12Х18Н9Т, 40Г18Ю3Ф и сталей перлитного класса 20Х2Н4А и 38ХС на молотах МПЧ 2, 3, 4, 6, 10 и 16 т. Исходные заготовки нагревали до ковочной температуры в газовых толкательных печах. Температуру нагрева металла контролировали и регулировали радиационным пирометром и электронным потенциометром ЭПД-12.

Промежуточные поковки обжимали на обрезных прессы усилием от 2500 до 16000 кН.

На молоте МПЧ 3 т штамповали промежуточные поковки диаметром 152 мм, толщиной стенки 32 мм из всех приведенных сталей.

Обжимные матрицы совмещенного обрезного штампа изготовили из стали 5ХНМ и высокопрочного чугуна (ВПЧ) с конической формой матричной

воронки, угол наклона образующей которых составляет 6° , 8° , 10° , 15° и 30° , а также с вогнутым и выпуклым профилями, выполненными соответственно по циклоиде и радиусу [4].

Отштампованные промежуточные поковки с облоем охлаждали, обмеряли и отмечали кернением диаметрально плоскость с наибольшей разностенностью.

Измерения толщины стенки в меридиональном сечении обжатых поковок показывают, что от торца поковок, контактировавшего с пуансоном в процессе обжима, наблюдается постепенное утолщение стенки по высоте. Конфигурация промежуточных поковок обуславливает расположение участка с наибольшим утолщением на обжатой поковке в области облоя. Далее утолщение уменьшается вследствие смятия кромок поковки в начальной стадии обжима и сдвиговых деформаций.

Высота поковок в результате обжима увеличивается в зависимости от профиля матрицы, относительной высоты и материала поковки на 1,5-3 %.

Исследования показали, что разностенность штампуемых поковок зависит от исходной на промежуточных поковках ($\Delta S_{исх}$), материалов контактирующей пары и рабочего профиля матрицы.

Обжим в матрицах из стали 5ХНМ сопровождается увеличением разностенности поковок из сталей перлитного класса на 40-50 % по сравнению с исходной и на 60-80% для поковок из сталей аустенитного класса. На поковках, полученных в матрицах из ВПЧ, имеет место уменьшение разностенности до 15-20%.

На рис. представлены зависимости изменения разностенности штампуемых поковок (ΔS_θ) при обжиге в матрицах из стали 5ХНМ и ВПЧ от угла наклона образующей рабочей части (α). Из приведенных данных видно, что с увеличением конусности матрицы снижается разнотолщинность поковок, что связано с ростом интенсивности деформации. Однако при углах наклона образующей рабочей поверхности более $12-15^\circ$ ухудшается качество поковок вследствие появления корсетности на обжатых поверхностях и торцовых заусенцев.

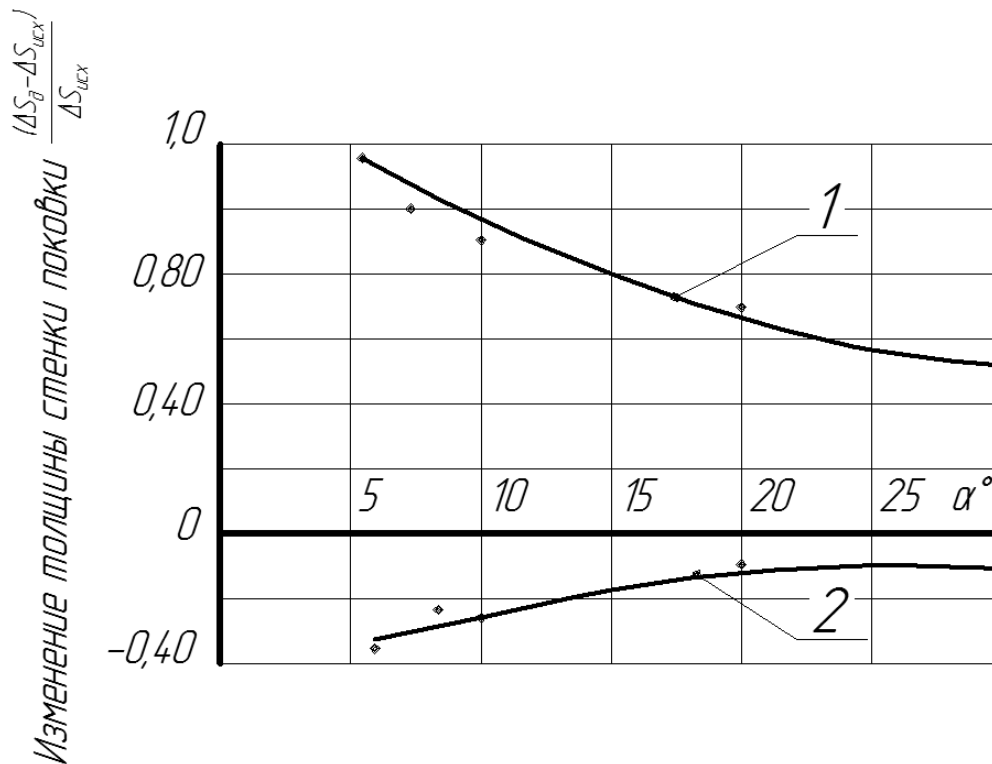


Рис. – Зависимость изменения разностенности поковок при их обжиге от угла наклона образующей конической части матрицы: 1 – из стали 5ХНМ; 2 – ВПЧ

Выводы:

1. Предложена частная классификация поковок, штампуемых с последующим обжимом, позволившая установить оптимальные конструктивные особенности штамповой оснастки и схемы технологических переходов штамповки.

2. Штамповка с последующим обжимом, характеризующаяся повышенными показателями по эффективности использования металла и качества материала поковок, рекомендуется для широкого применения при производстве предложенных групп поковок.

Список литературы: 1. Бичукин Ф.Д. Горячая малоотходная штамповка / Сб.: Опыт совершенствования технологии горячей штамповки на уральских заводах. – Свердловск.: УПИ, 1964. – С. 39-45. 2. РТМ2 Н83-12-76. Штамповка без штамповочных уклонов. – М.: НИИМАШ, 1977. – 116 с. 3. Саркисян С.А., Ахундов В.Н., Минаев Э.С. Большие технические системы. Анализ и прогноз развития. – М.: Наука, 1977. – 232 с. 4. Лобанов В.К. О выборе оптимального профиля и материала матриц для обжима поковок / В.К. Лобанов, В.М. Пилипенко // Кузнечно-штамповочное производство, 1976. – № 8. – С. 36-38. 5. Лобанов В.К. Совершенствование процесса штамповки пустотелых поковок типа барабанов / В.К. Лобанов // Кузнечно-штамповочное производство, 1979. – № 10. – С. 15-17. 6. Основы теории обработки металлов давлением / под ред. М.В. Сторожева. – М.: Машгиз, 1959. – 539 с. 7. Лобанов В.К. Штамповка с последующим обжимом поковок с переменной толщиной стенки / В.К. Лобанов // Кузнечно-штамповочное производство, 1978. – № 4. – С. 12-14.

Поступила в редколлегию 25.01.2014

УДК 621.771.63

Ю. А. ПОДЗОЛКОВА, магистрант, НТУ «ХПІ»;
Ю. А. ПЛЕСНЕЦОВ, канд. техн. наук, с.н.с., НТУ «ХПІ».

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ВАЛКОВОЙ ФОРМОВКЕ УПРОЧНЕННЫХ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ

С использованием метода сопротивления материалов пластическому деформированию определено напряженно-деформированное состояние металла при формовке рифлений на элементах упрочненных профилей и профилей с поверхностью противоскольжения. С использованием принципа энергетического равновесия работы деформирования и жесткости клетки получены аналитические зависимости для определения энергосиловых параметров процесса формовки элементов поверхности противоскольжения и рифлений. Минимизацией функционала полной потенциальной энергии решена задача нахождения фактической высоты рифлений и их осадки.

Ключевые слова: состояние напряженно-деформированное, энергосиловые параметры, рифления, фактическая высота, осадка.

Введение. В современных условиях ресурсосбережение является одним из ключевых элементов создания конкурентоспособной продукции. Увеличение прочностных характеристик гнутых профилей за счет дополнительной пластической деформации участков профилей, не подвергающихся упрочнению при обычном профилировании, способствует улучшению качества самих профилей, изделий с их применением, а также позволяет снизить расход металла без ухудшения прочностных характеристик готовой продукции.

Актуальность исследований. Увеличение прочностных характеристик гнутых профилей за счет дополнительной пластической деформации участков профилей, не подвергающихся упрочнению при обычном профилировании, способствует улучшению качества самих профилей, изделий с их применением, а также позволяет снизить расход металла без ухудшения прочностных характеристик готовой продукции. Сочетание высоких прочностных свойств с небольшим весом детали особенно важно в строительстве. Развитие строительной индустрии и различных подотраслей машиностроения требует расширенного применения гнутых профилей различного типа с гарантированным уровнем прочностных свойств, в том числе, упрочненных специальных гнутых профилей, в связи с чем, работы направленные на создание научных и технологических основ их производства, являются важными и актуальными.

Анализ литературы. Основная масса выявленных технических решений [1-11] направлена на разработку узкоспециализированного оборудования, обеспечивающего производство в каждом случае конкретного профиля для нужд машиностроения и строительства, а также на совершенствование существующих способов их производства. В качестве способов производства в этих решениях заявляется валковая формовка, при этом, практически все зарубежные фирмы используют один важный технологический прием, заключающийся в обеспечении жесткости продольных боковых элементов полосы, либо профилирования сквозных продольных рифлений различной конфигурации, усиливающих различные элементы профиля. Вместе с тем, сведения о производстве упрочненных специальных профилей в промышленных условиях, а также рекомендации по проектированию технологического процесса и расчету энергосиловых параметров их валковой формовки в научно-технической литературе отсутствуют.

Цель и задачи исследования. Целью работы является анализ формоизменения металла при валковой формовке упрочненных специальных профилей и возможностей организации их производства.

Методы исследования. Метод сопротивления материалов пластическому деформированию. Принцип энергетического равновесия работы деформирования и жесткости клетки. Минимизация функционала полной потенциальной энергии.

Постановка задачи. В соответствии с общеизвестной зависимостью удельная работа пластического формоизменения определяется

$$A_{уд} = \int_0^{e_i} \sigma_i de_i \quad (1)$$

полная работа внутренних сил

$$A = \iiint_V A_{уд} dV \quad (2)$$

Поскольку при валковой формовке периодических гофров местная вытяжка листового металла сопровождается утонением в зоне формовки гофров, т.е. имеет место плоское деформированное состояние, конечные деформации определяются следующим образом:

$$e_1 = -e_3 = \frac{\sqrt{3}}{2} e_i, \quad (3)$$

где e_1 – деформация в направлении ширины гофра;

e_3 – деформация по толщине металла гофра.

Распределение утонения по поперечному сечению гофров определяется по зависимости

$$\Delta S = 2 \int_0^{s/2} e_3 dy, \quad (4)$$

где S – толщина металла.

Для теоретического анализа процесса валковой формовки поверхностей противоскольжения на первом технологическом переходе использован принцип энергетического равновесия работы деформирования и жесткости клетки

$$\Phi = \frac{1}{2} G (H_1 - H)^2 + A_{ДЕФ}(H) \rightarrow \min, \quad (5)$$

где G – жесткость клетки;

H – высота формируемых рифлений;

H_1 – высота гофра по калибру вала;

$A_{ДЕФ}(H)$ – работа деформации при вытяжке рифлений.

Для анализа формоизменения металла принята схема очага деформации, приведенная на рис. 1.

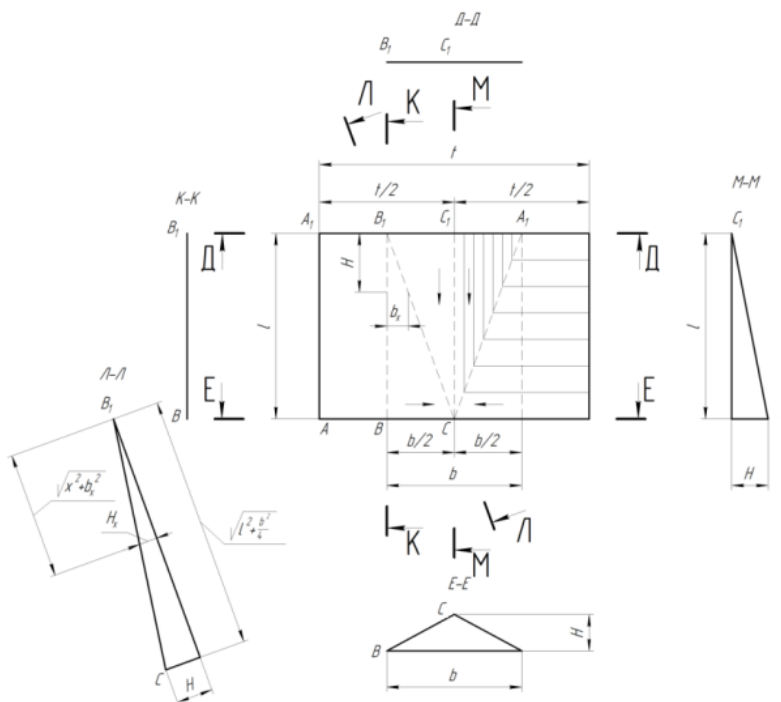


Рис. 1 – Схема очага деформации, принятая для анализа формоизменения металла при вытяжке рифлений

В связи с незначительной высотой формуемых рифлений, приняты следующие допущения:

- деформации растяжения в очаге имеют место на участке, не превышающем ширину рифления;
- напряжения и деформации связаны по линейному закону;
- валки изгибаются по дуге постоянной кривизны.

Задача нахождения фактической высоты рифлений решалась минимизацией функционала полной потенциальной энергии

$$\Phi_1 = A_{ДЕФ}(H) - PH \rightarrow \min \quad (6)$$

$$\Phi_2 = 2 \int_{\nu} A_{ПР}(\Delta H) dV + \sum_{i=1}^n A_{ДЕФ}(H - 2\Delta H_i) + \frac{1}{2} G(H_2 - H)^2 \rightarrow \min \quad (7)$$

где n – число формуемых рифлений;

V – объем валка;

ΔH_i – прогибы валков при формовке рифлений;

$A_{ПР}(\Delta H)$ – работа прогиба валка, зависящая от его ширины;

H – высота крайних формуемых рифлений.

Для исследования процессов осадки отформованных рифлений использовали принцип минимума полной потенциальной энергии

$$\Phi_3 = A_{ВНУТР} - A_{ВНЕШН} \rightarrow \min, \quad (8)$$

где $A_{ВНУТР}$ – работа внутренних сил (работа деформирования);

$A_{ВНЕШН}$ – работа внешних сил.

Расчетная схема, принятая для анализа процесса осадки, приведена на рис. 2.

Основные результаты. В конечном виде выражение (7) можно выразить следующей зависимостью

$$\Phi = \frac{16Ed_B^4 \Delta h^2}{3B^3} + \frac{1}{2} G(H_2 - H)^2 + 2 \sum_{i=1}^{nh} 2S \frac{l}{4} \left[\left(\sigma_T + \Pi \frac{(H - \Delta h_i)^2}{B^2} \right) \cdot \frac{(H - \Delta h_i)^2}{B^2} + \left(\sigma_T + \Pi \frac{(H - \Delta h_i)^2}{B^2} \right) \cdot \frac{(H - \Delta h)^2}{B^2} \right] \rightarrow \min, \quad (9)$$

где Δh_i – значение стрелы прогиба в расчетном сечении, определяемое по зависимости

$$\Delta h_i = \frac{2Z_i}{B} \Delta h \quad (10)$$

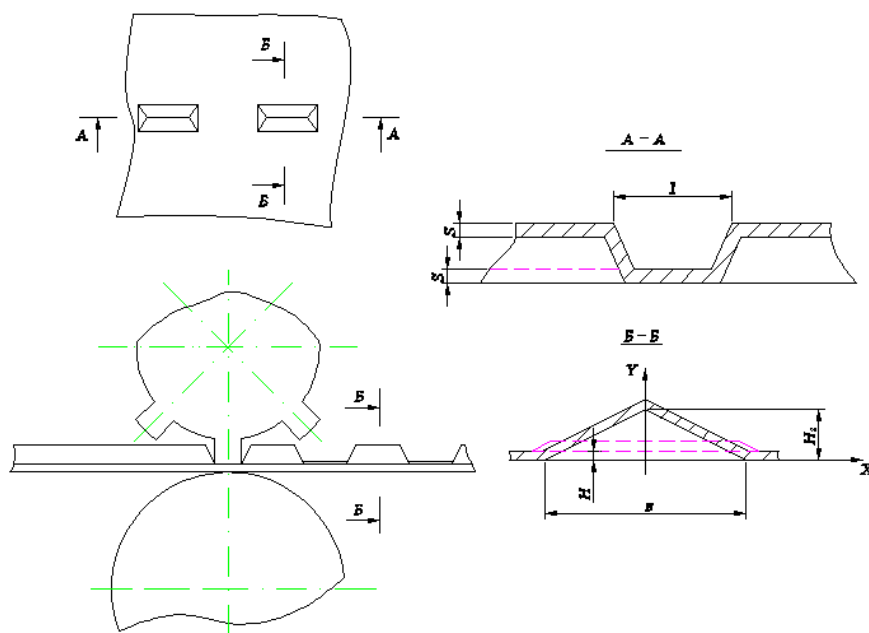


Рис. 2 – Расчетная схема для анализа процесса осадки

В результате расчетов по полученным зависимостям установлено, что полная осадка рифления обеспечивается усилием 9 кН.

Следует отметить, что расчетные значения усилий и крутящих моментов при вытяжке гофров на 34% выше, чем при их осадке.

Расчетные значения энергосиловых параметров валковой формовки поперечных периодических гофров, выполненные по зависимостям (1.10), (1.12), составляют: 70 кН – усилие вытяжки рифления; 23 кНм – крутящий момент.

Выводы:

1. С использованием метода сопротивления материалов пластическому деформированию определены компоненты напряженно-деформированного состояния металла при формовке рифлений на элементах упрочненных профилей и профилей с поверхностью противоскольжения.

2. С использованием принципа энергетического равновесия работы деформирования и жесткости клетки получены аналитические зависимости для определения энергосиловых параметров процесса формовки элементов поверхности противоскольжения и рифлений.

3. Минимизацией функционала полной потенциальной энергии решена задача нахождения фактической высоты рифлений и их осадки.

Список литературы. 1. *Тришевский И. С.* Теоретические основы процессов профилирования / И. С. Тришевский, М. Е. Докторов. – М.: Металлургия, 1980. – 288 с. 2. *Тришевский И.С.* Калибровка валов для производства гнутых профилей проката / под ред. И.С. Тришевского. – Киев: Техника, 1980. – 288 с. 3. *Тришевский И.С.* Производства гнутых профилей (оборудование и технология). – М.: Металлургия, 1982. – 384 с. 4. *Применение гнутых профилей проката: справочник / И. С. Тришевский, Г. В. Донец, М. Е. Докторов и др.* – М.: Металлургия, 1975. – 421 с. 5. *Березовский С.Ф.* Производство гнутых профилей: С.Ф. Березовский, И.С. Тришевский. – М.: Металлургия, 1985. – 200 с. 6. *Тришевский И.С.* Гнутые профили проката: справочник / И.С. Тришевский, В. В. Лемпицкий, Н.М. Воронов и др. / под ред. И.С. Тришевского. – М.: Металлургия, 1980. – 351 с. 7. *Унксов Е.П.* Теория пластических деформаций металлов / Е.П. Унксов, А.Г. Овчинников. – М.: Машиностроение, 1983. – 364 с. 8. *Кроха В.А.* Упрочнение металлов при холодной пластической деформации: справочник / В.А. Кроха. – М.: Машиностроение, 1980. – 158 с. 9. *Гун Г. Я.* Теоретические основы обработки металлов давлением / Г.Я. Гун. – М.: Металлургия, 1980. – 456 с. 10. *Колмогоров В.Л.* Механика обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с. 11. *Чиченев Н.М.* Методы исследования процессов обработки металлов давлением / Н.М. Чиченев, А.Б. Кудрин, П.И. Полухин. – М.: Металлургия, 1977. – 287 с.

Поступила в редколлегию 14. 02.2014

УДК 006.015.5

В. В. СЕБКО, докт. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;

В. Н. БАБЕНКО, ассистент, НТУ «ХПИ»;

Е. Н. РЯБОВОЛ, студент, НТУ «ХПИ».

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТУХАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПРОМЫШЛЕННОЙ МИКРОВОЛНОВОЙ КАМЕРЕ

Предложен алгоритм совместного измерительного контроля коэффициента затухания h_r , относительной магнитной проницаемости μ_r , удельной электрической проводимости σ_t и температуры t стенки микроволновой камеры с помощью экранного вихретокового устройства. Предложен четырехпараметровый вихретоковый метод измерительного контроля относительной магнитной проницаемости, удельной электрической проводимости, температуры и коэффициента затухания однородного магнитного поля в стенке микроволновой камеры. Приведены основные соотношения, описывающие четырехпараметровый экранный метод.

Ключевые слова: микроволновая камера, алгоритм совместного измерительного контроля, вихретоковое устройство.

Введение. В настоящее время в таких отраслях промышленности как перерабатывающая и пищевая, изготовление строительных материалов, а также диэлектрических веществ и материалов, которые используются в машиностроении и приборостроении, широко используют микроволновые технологии (МТ) [1–4]. При этом одной из основных проблем современной промышленности Украины является обеспечение необходимого уровня качества выпускаемой продукции.

Анализ последних исследований и литературы показывает, что современные МТ охватывают такие важные технологические процессы как сушку и пастеризацию продовольственного сырья и пищевых продуктов, сушку пиломатериалов, а так же тепловую обработку конструкционных диэлектрических материалов [1–4]. При этом для повышения качества продукции недостаточно установить стандарты на конечные параметры готовой продукции, необходимо учитывать весь комплекс факторов, которые влияют на качество в целом [5]. Стабильное развитие перерабатывающей и пищевой промышленности непосредственно зависит от уровня технического оборудования при реализации методов микроволновой обработки.

МТ предусматривают: источник СВЧ энергии, технологическую рабочую камеру, а также систему автоматического регулирования параметров технологического процесса электромагнитной обработки диэлектрических веществ и материалов [1–4]. Сама по себе обработка представляет собой сложный тепловой процесс и поэтому базируется на теоретических положениях тепломассообмена [1, 2].

Следует отметить, что микроволновые технологии обработки веществ и материалов по сравнению с радиационными и конвективными технологиями обработки обладают высокой эффективностью и продуктивностью, что очень важно для повышения уровня качества продукции [1–4].

В работах [1, 2] рассмотрены методы обработки арахисового сырья на основании применения генераторов СВЧ, а также методы определения теплопроводности и температурных параметров, диэлектрической проницаемости орехов арахиса, проведен анализ органолептических показателей арахисового сырья при реализации МТ.

В научных работах [3, 4] рассмотрены методы повышения точности измерений параметров теплофизического состояния диэлектрических материалов в микроволновых промышленных технологиях. Исследованы некоторые параметры оптимизации рабочих режимов МТ, а также рассмотрены пути определения показателей качества диэлектрических материалов, указанных в государственных нормативных документах: температура, влажность, теплопроводность, температуропроводность и т.д. [3, 4]. При этом авторы работ [1–4] не учитывают влияния магнитного поля на результаты определения параметров диэлектрических материалов, используя в качестве датчиков мощных магнитных полей оптические датчики и считая, что энергия

СВЧ переходит в тепловую. Таким образом, остался без внимания контроль такого важного параметра МТ, как коэффициента затухания магнитного поля h_t , что снижало общую достоверность измерительного контроля параметров исследуемых диэлектрических образцов из-за возникновения дополнительной погрешности. В работе [5] предложено экранное устройство для контроля параметров плоских листов, которое включает в себя два накладных электромагнитных датчика, между которыми находится ферромагнитный лист, при этом перемещение в небольших пределах этого листа (между двумя датчиками) не влияет на результаты определения относительной магнитной проницаемости μ_r и удельной электрической проводимости σ , поскольку удаление листа от одного датчика приводит к приближению к другому датчику [5]. Следовательно, результат измерительного контроля электромагнитных и физико-механических параметров не зависит от смещения листа, такое устройство является экранным, так как лист разделяет измерительную обмотку на одной поверхности листа, а намагничивающую на другой. В работе [6] рассмотрено экранное трубчатое устройство и четырехпараметровый экранный вихретоковый метод измерительного контроля параметров ферромагнитных труб. При этом радиальное смещение трубы не влияет на результаты измерений, поскольку трубчатое изделие удаляется на определенное расстояние от одной обмотки и настолько же приближается к другой – это свойство экранного датчика, труба является экраном, так как разделяет намагничивающую и измерительную обмотки (намагничивающая обмотка находится вне трубы, а измерительная внутри). В работах [7–10] была рассмотрена теория работы ТВП с плоскими немагнитными и ферромагнитными изделиями. Приведены схемы включения ТВП с плоскими изделиями и определены геометрические, электромагнитные и температурные параметры немагнитных и магнитных плоских изделий, однако вопросы экранных свойств плоских изделий практически остались без внимания. В то же время для определения оптимальных режимов работы МТ, необходимо знать коэффициенты затухания магнитного поля h в промышленных камерах для сушки продовольственного сырья (в процессе работы). Следует отметить, что если учитывать геометрические (толщину и ширину), а также электрические и магнитные параметры μ_r и σ слабомагнитных пластин, из которых изготовлена камера, с помощью электромагнитного датчика (который находится внутри камеры) можно определить коэффициент затухания

магнитного поля h в стенке камеры. Следовательно h_t зависит от температуры микроволнового процесса, а также геометрических и электромагнитных параметров материала камеры. Для определения оптимальных режимов работы МТ, которые обеспечивают показатели качества подвергаемого тепловой обработке сырья указанные в нормативных документах, также необходимо знать коэффициент затухания h магнитного поля в микроволновой камере.

Таким образом, возникает важная научная и практическая проблема, которая состоит в создании теории работы вихретоковых устройств совместного измерительного контроля многих параметров материалов, изделий и конструкций, используемых для реализации микроволновых технологий.

Целью исследования является исследование многопараметрового вихретокового метода измерительного контроля относительной магнитной проницаемости μ_{rt} , удельной электрической проводимости σ_t , температуры t , коэффициента затухания h_t магнитного поля в стенке камеры. Поскольку, параметры μ_{rt} , σ_t и h_t являются термозависимыми (зависят от температуры микроволнового процесса), необходим совместный измерительный контроль электромагнитных и температурных параметров, что в свою очередь, позволяет установить оптимальные режимы работы микроволновых устройств и повысить достоверность контроля диэлектрических параметров обрабатываемых материалов и веществ за счет повышения инструментальной составляющей достоверности контроля. Для достижения цели работы необходимо решить следующие задачи:

1. Привести основные соотношения описывающие исследуемый четырехпараметровый вихретоковый метод измерительного контроля параметров μ_{rt} , σ_t , h_t и t .

2. Предложить алгоритм совместного измерительного контроля электромагнитных и температурных параметров с помощью экранного вихретокового устройства.

Материалы исследований предполагают совместный измерительный контроль электромагнитных и температурных параметров на базе экранного вихретокового устройства. Воспользовавшись результатами работ [5–10], в которых описан процесс проникновения однородного переменного магнитного поля в плоское проводящее изделие, запишем выражение для магнитного потока Φ_{2t} и фазы φ_{2t} в плоском проводящем изделии [5–9]

$$\Phi_{2t} = \sqrt{2} \cdot \mu_0 \cdot \mu_{rt} \cdot H_0 \cdot S \cdot \sqrt{\frac{1 + e^{-2x_t} - 2e^{-x_t} \cdot \cos x}{x_t}} \quad (1)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_t = - \frac{1 - e^{-x_t} \cdot \cos x - e^{-x_t} \cdot \sin x}{1 - e^{-x_t} \cdot \cos x + e^{-x_t} \cdot \sin x} \quad (2)$$

где H_0 – напряженность внешнего по отношению к пластине магнитного поля,
 S – площадь пластины,
 x_t – обобщенный параметр (характеризующий собой отношение толщины пластины d к классической глубине проникновения δ) [5-10].

Выражение для магнитного потока Φ_0 , который проходит внутри соленоидальной катушки имеет следующий вид:

$$\Phi_0 = \frac{2S_k \cdot \mu_0 \cdot \sqrt{2} \cdot I \cdot W_1}{e_k} \quad (3)$$

Формула для магнитной индукции в стенке прямоугольного параллелепипеда (который представляет собой СВЧ камера) с учетом [5–10] имеет следующий вид:

$$B_{2t} = \sqrt{2} \cdot \mu_0 \cdot \mu_{rt} \cdot H_0 \cdot \sqrt{\frac{1 + e^{-2x_t} - 2e^{-x_t} \cdot \cos x}{x_t}} \quad (4)$$

При этом, магнитная индукция B_0 определяется из выражения [5–9]

$$B_0 = 2\mu_0 \cdot H_0 \quad (5)$$

Как известно, коэффициент затухания магнитного поля h_t находят [5]

$$h_t = \frac{B_{2t}}{B_0} \quad (6)$$

Таким образом, с учетом формул (1–6) выражение для определения коэффициента затухания h_t внутри СВЧ камеры можно записать:

$$h_t = \frac{1}{2} \left[\sqrt{2} \cdot \mu_{rt} \cdot \sqrt{\frac{1 + e^{-2x_t} - 2e^{-x_t} \cdot \cos x}{x_t}} \right] \quad (7)$$

Определив обобщенный магнитный параметр x [5–10], находим по табличной зависимости $k=f(x)$ параметр k [5–10], после чего определяем удельную электрическую проводимость σ_t в стенке камеры, измерив E_{2t} и E_0 на основании известных схем включения, в итоге для σ_t имеем

$$\sigma_t = \frac{x_t^2 \cdot S \cdot E_0 \cdot K_t}{S_k \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \mu_0 \cdot E_{2t} \cdot f_t} \quad (8)$$

Температуру t определяем из выражения

$$t = \frac{1 + \alpha \cdot t_1}{\alpha} \cdot \left(\frac{\pi \cdot d^2 \cdot \mu_0 \cdot E_{2t} \cdot f_t \cdot S_k}{\rho_1 \cdot x_t^2 \cdot E_0 \cdot S \cdot K_t} - 1 \right) + t_1 \quad (9)$$

Относительную магнитную проницаемость μ_{rt} в стенке камеры определяем на основании известной зависимости [11]

$$\mu_{rt} = \mu_{r1} + \frac{\mu_{r1} \cdot \alpha}{1 + \alpha \cdot t_1} \cdot (t - t_1) \quad (10)$$

из выражения:

$$\mu_{rt} = \frac{E_{\Sigma t} \cdot \sin \varphi_0}{S \cdot [4,44 \cdot f_t \cdot W_2 \cdot \mu_0 \cdot H_0]} \quad (11)$$

Далее подставив (11) в формулу (7) находим h_t .

Как известно, методическая составляющая достоверности контроля D_m определяется, как [12]

$$D_m = \frac{N_1}{N} \quad (12)$$

где N – общее количество показателей, которые характеризуют техническое состояние объекта контроля;

N_1 – количество показателей, которые вошли в модель контроля.

Инструментальная составляющая достоверности контроля $D_{ин}$ определяется вероятностью ошибок первого α и второго β рода определения параметров контроля [12]

$$D_{ин} = 1 - \alpha - \beta \quad (13)$$

Общая достоверность контроля $D_{общ}$, выражается произведением [12]

$$D_{\text{общ}} = D_{\text{м}} \cdot D_{\text{и}}. \quad (14)$$

Как показывает анализ приведенных выше формул, определение большого числа параметров влияющих на объект контроля, повышает методическую составляющую достоверности контроля.

Снижение численных значений погрешностей измерения параметров, в свою очередь, повышает инструментальную составляющую достоверности контроля. Следует отметить, что общая достоверность контроля $D_{\text{общ}}$ за счет приведенной методики измерительного контроля коэффициента затухания магнитного поля h_t в стенке микроволновой камеры повышается и составляет 0,956.

Выводы.

1. В рамках исследования важной научной и практической проблемы, которая состоит в создании теории работы вихретоковых устройств совместного измерительного контроля многих параметров материалов, изделий и конструкций, используемых для реализации микроволновых технологий, предложен четырехпараметровый вихретоковый метод измерительного контроля относительной магнитной проницаемости μ_{r_t} , удельной электрической проводимости σ_t , температуры t и коэффициента затухания h_t однородного магнитного поля в стенке микроволновой камеры.

2. Приведены основные соотношения, описывающие данный четырехпараметровый экраный метод. Предложен алгоритм совместного измерительного контроля коэффициента затухания h_t , а также электромагнитных и температурных параметров с помощью экранного вихретокового устройства. Получено численное значение общей достоверности контроля параметров диэлектрических материалов, при этом значение $D_{\text{общ}}$ повышается, за счет приведенной методики измерительного контроля коэффициента затухания магнитного поля h_t в стенке микроволновой камеры, и составляет 0,956.

3. Научной новизной работы является повышение общей достоверности контроля за счет измерительного контроля коэффициента затухания магнитного поля h_t в стенке микроволновой камеры.

4. Практическое значение работы состоит в том, что полученные выражения для определения коэффициента затухания магнитного поля h_t , удельной электрической проводимости σ_t , температуры t и относительной

магнитной проницаемости μ_{rt} , позволяют исследовать оптимальные режимы работы микроволновых устройств и тем самым повысить качество обработки диэлектрических материалов при реализации микроволновых технологий.

5. Перспективным направлением исследований является создание автоматизированных систем управления и контроля температурных параметров при реализации микроволновых технологий, на базе первичных тепловых вихретоковых преобразователей.

Список литературы: 1. Кудрявцев В.Н. Усовершенствование микроволновой технологической камеры / Заплетников И.Н., Кудрявцев В.Н. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. Сб. науч. Тр. – Донецк: ДонНТУ, 2004. Вып. 26.-С. 136-144. 2. Заплетников И.Н., Кудрявцев В.Н. О результатах воздействия электромагнитного поля на процесс сушки орехового сырья // Управлінські та технологічні аспекти розвитку підприємств харчування та торгівлі: Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої 65-річчю з дня народження доктора техн. наук, проф., члена-кореспондента ВАСГНГІЛ Беляева М.І. / Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. – Харків, 2003. С. 243-245. 3. Юрчик Г.В., Водотовка В.І. Інформаційно-вимірювальна система мікрохвильового технологічного процесу: канал вимірювання швидкості повітряного потоку / Г.В. Юрчик, В.І. Водотовка // Вісник національного університету «Львівська політехніка».- 2002.-№468.-С. 10-18. 4. Юрчик Г.В. Підвищення точності вимірювання при контролі енергетичних і теплофізичних параметрів мікрохвильових технологій: Монографія. / Юрчик Г.В.- Львів: Тріада плюс, 2008.-176 с. 5. Герасимов В.Г., Клюев В.В., Шатерников В.Е. Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 272 с. 6. Себко В.В. Экранное трубчатое многопараметровое вихретоковое устройство // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2006. – Вып. 39. – С. 18-29. 7. Себко В.П., Кириченко Р.И. Определение пределов измерений сигналов электромагнитного преобразователя с плоским проводящим изделием // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2000. – Вип. 12. – С. 403-406. 8. Себко В.П., Кириченко Р.И. К теории работы трансформаторного электромагнитного преобразователя с плоским проводящим изделием // Технічна електродинаміка. – Київ: Ін-т електродинаміки НАНУ. – 2000. – Тем. випуск, Ч. 1. – С. 93–98. 9. Себко В.П., Глоба С.Н. Определение критических значений частот магнитного поля и толщин плоских изделий. – Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 1999. -Вып. 24. - С. 21-25. 10. Себко В.В. Трансформаторный вихретоковый датчик с пластиной, зондируемой полемкратных частот // Український метрологічний журнал. -Харків. – 2007. – Вип. 2. – С. 26-29. 11. Спектор С.А. Электрические измерения физических величин. -Л.;Энергоатомиздат,1987. – 320 с. 12. Дунаев Б.Б. Точность измерений при контроле качества. –К.: Техніка, 1981. – 150 с.

Надійшла до редакції 17.12.2013

УДК 621.981.06

В. Т. СИКУЛЬСКИЙ, канд. техн. наук, доц., проф., НАУ «ХАИ», Харьков

ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ПАНЕЛЕЙ С ПРОДОЛЬНЫМ ОРЕБРЕНИЕМ МЕСТНОЙ ГИБКОЙ С ПОСАДКОЙ (РАЗВОДКОЙ)

Приведено описание нового процесса получения панелей сложных форм местным деформированием с использованием оригинального устройства, в котором реализуется местный изгиб ребра с совместной деформацией посадки и разводки. На примере получения панелей двойной кривизны

приведены сравнительные характеристики процесса посадки и разводки. Приведена инженерная методика расчета распределения локальных воздействий, описаны результаты испытания процесса на образцах из алюминиевых сплавов и приведены основные технологические рекомендации.

Ключевые слова: формообразование, посадка, разводка, изгиб, доводка формы, двойная кривизна.

Введение. В конструкции самолетов и других машин используются панели с продольным оребрением, получаемые прокаткой или прессованием в плоском виде. Для применения в конструкции машин панели должны быть отформованы по требуемым формам с высокой точностью. Формообразование панелей с оребрением известными методами – сложный и трудоемкий процесс, при котором используется специальная оснастка. Процессы формообразования характеризуются большим объемом доводочных работ каждого изделия, что объясняется технологическими отклонениями поперечного сечения панелей при получении заготовок или после последующей механической обработки.

Постановка задачи исследования. Анализ публикаций, направленных на совершенствование технологического процесса формообразования панелей, показывает, что для успешного применения их на предприятиях они должны обладать следующими качествами [1].

1. Возможность правки и доводки панелей как самостоятельно, так и в сочетании с другими методами деформирования;
2. Универсальность устройства, обеспечивающего формообразование разнообразных форм и с широким диапазоном размеров поперечных сечений;
3. Формообразование панелей с положительной и отрицательной кривизной;
4. Местную правку и доводку панелей с отклонениями формы в разные стороны;
5. Минимальное технологическое усилие в целях использования прессов, применяемых в отрасли;
6. Малые припуски на зачистку после формообразования или отсутствие процесса зачистки;
7. Возможность гибки отдельных ребер, в том числе и в разные стороны [2];
8. Возможность монотонного изменения формы с целью поэтапного контроля формы, корректировки процесса и повышения точности формы;
9. Приемлемые сроки разработки процесса и изготовления оснастки и инструмента.

Для создания технологического процесса, удовлетворяющего заданным требованиям, было невозможно использовать процессы деформирования с нагревом, так как для большинства алюминиевых сплавов использование нагрева до температур эффективного деформирования запрещено действующими инструкциями. По этой же причине нельзя использовать процессы, в основе которых применяются явления ползучести или сверхтекучести. Использование процессов вытяжки и других процессов холодного деформирования ограничено отсутствием технологических припусков по ширине панели, что связано с особенностями получения заготовок. Кроме того, при деформировании таким образом большое влияние на процесс деформирования оказывают ребра панелей, жесткость которых существенно больше жесткости полотна.

Используемые в отрасли процессы дробеударного формообразования обеспечивают получение панелей с одинарной кривизной поперек оребрению, либо небольшой двойной кривизны при маложестком или прерывистом оребрении.

Цель исследования. Развитие самолетостроения и других отраслей ставит задачу получения целого ряда сложных форм панелей с оребрением, что, в свою очередь, требует создания технологических процессов, удовлетворяющих приведенным требованиям [3].

Материалы исследований. Для решения заданной задачи был выбран метод местного деформирования участка ребра с прилегающим полотном, при этом схема деформирования представляла собой местный изгиб в сочетании с посадкой или разводкой.

Сущность процесса получения панели сложной формы состоит в поэтапном придании панели обобщенного поля деформаций, состоящего из отдельных местных (локальных) деформаций. Эти местные деформации должны быть распределены определенным образом по панели и по времени их приложения, чтобы обобщенные деформации соответствовали постепенному приближению к требуемой форме панели при условии образования минимальных остаточных напряжений в полотне и ребрах панели. Исследования показали, что обеспечить эти условия только посадкой или разводкой невозможно. Поэтому в качестве местной деформации было решено применять деформацию участка полотна и ребра панели в направлении оси ребра и совместный изгиб этого участка в плоскости ребра.

Для реализации данного процесса был создан специальный штамп, внешний вид которого приведен на рис. 1. Штамп содержит две пары верхних губок и одну пару нижних губок, укрепленных подвижно соответственно на верхних и нижних плитах.

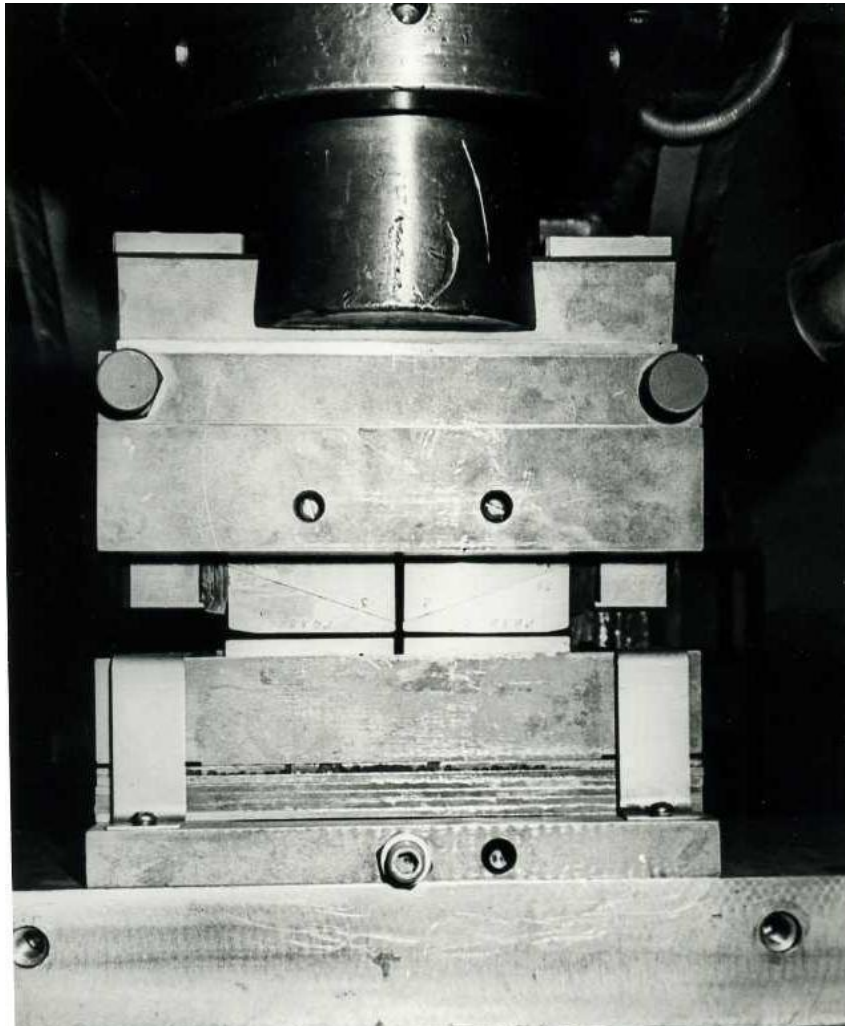


Рис. 1 – Штамп для формоизменения панелей посадкой с изгибом

В исходном положении верхние губки допускают свободное перемещение панели вдоль штампа, который устанавливается в одностоечный пресс. При нажатии прессы и увеличении усилия до 5-10 Кн верхние пары губок захватывают ребро панели. В таком положении верхние губки поддерживают ребро в течение всего процесса деформирования. При возрастании усилия до 200-300 Кн штамп изгибает участок ребра с прилегающим участком полотна на угол до нескольких градусов. При столь малых прогибах соседние ребра не оказывают заметного влияния на процесс в очаге деформации. Для изменения

величины прогиба штамп снабжен клиновым регулятором с винтовым приводом, установленным под нижними губками.

При дальнейшем увеличении усилия до 1500-2000 Кн верхние и нижние губки совместно сближаются при посадке, либо раздвигаются при разводке. В конструкции штампа предусмотрено осуществление обоих режимов, причем, время переналадки с одного режима на другой занимает не более нескольких минут. Совместное действие изгибающих и сжимающих (или растягивающих) напряжений уменьшает величину пружинения и положительно отражается на качестве гибки.

Рассмотрим упрощенную методику расчета приложения местных воздействий на примере получения панели двойной кривизны. Представим получение двойной кривизны в два этапа. На первом этапе получаем одинарную кривизну поперек продольному оребрению R_c , на втором – создаем поле деформации с изгибом панели с продольным радиусом R_p . В случае использования процесса разводки с изгибом средние зоны панели должны быть удлинены в зависимости от радиуса R_p . При использовании процесса посадки с изгибом для получения радиуса R_p периферийные части панели должны быть сокращены (рис. 2, б).

На рис. 2 представлены возможные поля деформаций при получении двойной кривизны разводкой средних зон (рис. 2, а) и посадкой периферийных зон (рис. 2, б).

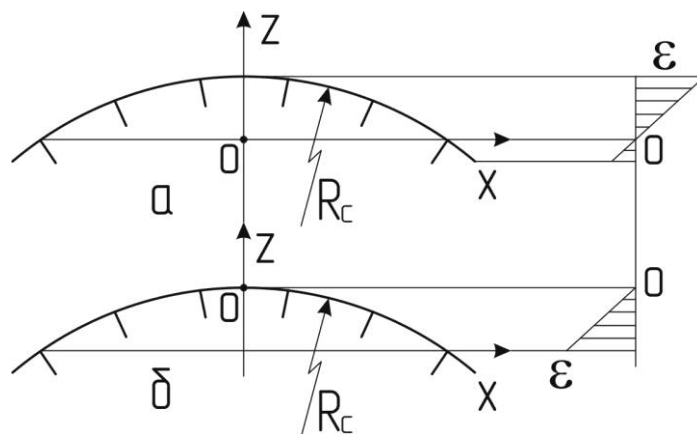


Рис.2 – Относительные деформации при образовании двойной кривизны методом:
а – разводки; б – посадки

Расстояние между точками воздействия штампа на каждом ребре при получении панелей двояковыпуклой формы разводкой могут быть определены по следующей методике. В этом случае крайние ребра панели не деформируют,

а главные относительные деформации вдоль продольных осей средних ребер в точке пересечения вертикальной оси ребра и срединной плоскости полотна

$$\varepsilon_i = (\sqrt{R_c^2 - x^2} - \sqrt{R_c^2 - l^2}) / R_n, \quad (1)$$

где R_n, R_c – продольный и поперечный радиусы кривизны панели;

$2l$ – расстояние между крайними ребрами в поперечном сечении панели;

x – расстояние от оси симметрии поперечного сечения панели до деформируемого ребра.

Величина деформации вдоль оси ребра при одном воздействии штампа

$$e = t_i \varepsilon_i, \quad (2)$$

где t_i – расстояние между двумя соседними точками воздействия при одном ребре.

С другой стороны величина деформации при одном воздействии может быть представлена

$$e = ks, \quad (3)$$

где k – допускаемая относительная деформация, устанавливаемая директивными документами;

s – величина растягиваемого участка панели в направлении оси ребра при разводке. Обычно эта величина составляет 15-25 мм.

Расстояние между точками воздействия на одном ребре определяется из зависимости (2) с учетом (1) и (3):

$$t_i = ksR_n (\sqrt{R_c^2 - x^2} - \sqrt{R_c^2 - l^2})^{-1} \quad (4)$$

Аналогично при получении панелей двояковыпуклой формы посадкой периферийных ребер расстояние между точками воздействия

$$t_i = ksR_n (R_c - \sqrt{R_c^2 - x^2})^{-1} \quad (5)$$

Здесь s – величина сжимаемого участка панели в направлении оси ребра. При посадке эта величина лежит в пределах 4-8 мм.

Результаты вычисления по формулам (4) и (5) показывают, что расстояние между точками воздействия при посадке в 3-4 раза больше, чем при формообразовании с посадкой. Следовательно, число воздействий при разводке во столько же раз меньше, что выгодно отличает этот процесс при получении панелей двойной кривизны.

Результаты исследования. Полученные образцы панелей (рис. 3) размерами 500x1000 мм и ребрами высотой 30 мм имели гладкую поверхность без огранки. Дополнительная обработка или зачистка мест разводки двояковыпуклых панелей не требуется. Места посадки с внешней стороны требуется зачищать, так как выступание материала достигает 0,05-0,1 мм над уровнем полотна панели. Зачистка ребра в обоих случаях не требуется, так как деформация ребра не локализуется в пространстве между губками. На образцах были достигнуты минимальные радиусы продольной кривизны 6,5 м, поперечной – 3 м.

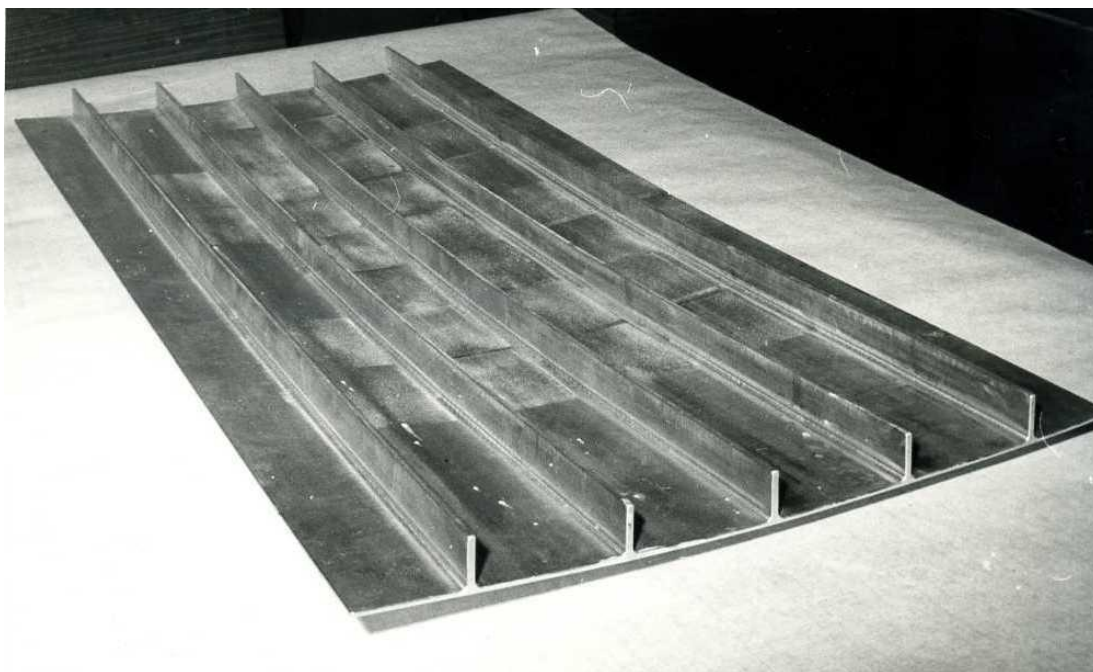


Рис.3 –Образец панели двойной кривизны, отформованный методом местного изгиба с разводкой

Двойная кривизна панели достигалась как из плоских образцов, так и с панелей одинарной кривизны. Схема технологического процесса в этом случае оставалась прежней.

Экспериментальная проверка технологии и штампа на образцах панелей из сплава Д16Т показала, что двояковыпуклые панели целесообразно получать

разводкой средней части панели, а двояковогнутые – посадкой периферийных участков панелей с соответствующим углом гибки ребер.

Штамп может найти широкое применение при доводке формы панели. Он позволяет подгибать на малые углы отдельные ребра панели на базе 10-20 мм, что весьма сложно осуществить другими методами.

Наиболее предпочтительным является использование штампа и технологии формообразования панелей двойной кривизны применительно к роботизированному комплексу на базе прессы с ЧПУ. В этом случае пресс должен быть оснащен позиционирующим устройством, обеспечивающим перемещение панели в соответствии со схемой распределения элементарных воздействий, а также установку панели по нормали к оси плунжера прессы в месте приложения воздействия. Пресс должен быть оснащен системой ограничения рабочего усилия, а более предпочтительно, – устройством контроля величины деформации материала панели. Последнее условие необходимо для обеспечения повторяемости и стабильности процесса.

Для исключения доводочных работ целесообразно оснастить комплекс измерительной системой, контролирующей форму панели в реальном масштабе времени.

Выводы. В перспективе возможно создание гибкого производственного модуля формообразования панелей, в котором возможно получение панелей и других форм, например, конической и цилиндрической, когда ребра панели не совпадают с образующими, и др. Модуль может быть оснащен сменным инструментом, в состав которого будет входить как упомянутый штамп, так и другой инструмент, разработанный авторами; например, инструмент для правки и доводки формы монолитных панелей.

Список литературы: 1. Веричев С. Н., Максименко В. Н., Левяков С. В. Forming of monolithic stiffened double-curvature panels of aircraft structures. В кн.: Proceedings of 2009 International Forum on Strategic Technologies, October 21-23. Ho Chi Minh City, Vietnam: Vietnam National University, Ho Chi Minh City Publishing House. с.185-187. 2. В.Т. Сикульский. Создание технологии правки и доводки формы монолитных панелей без использования прессы. В кн.: Авиационно-космическая техника и технология, №3/100, 2013, с. 31-35. 3. В.Т. Сикульский. Формообразование монолитных панелей сложных форм. В кн.: Авиационно-космическая техника и технология, №5-102, 2013, с. 15-19.

Поступила в редколлегию 28.10.2013

УДК 621.774.3

С. Л. СТАСЕВСКИЙ, директор института, ГП «УКРГИПРОМЕЗ»,
Днепропетровск;

А. Н. СТЕПАНЕНКО, главный инженер института, ГП
«УКРГИПРОМЕЗ», Днепропетровск;

Ю. Д. УГРЮМОВ, канд. техн. наук, вед. инженер, ОВЭСТ, ГП
«УКРГИПРОМЕЗ», Днепропетровск;

Б. Г. ПАВЛОВСКИЙ, канд. техн. наук, вед. инженер, ПАО «Интерпайп
НТЗ», Днепропетровск;

Д. Ю. УГРЮМОВ, вед. специалист, ПАО «Интерпайп НТЗ»,
Днепропетровск.

НАПРАВЛЕНИЯ МОДЕРНИЗАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ ТРУБОПРОКАТНОГО АГРЕГАТА 5-12" С ПИЛИГРИМОВЫМИ СТАНАМИ ПАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ»

Рассмотрены вопросы проведения модернизации и реконструкции пилигримового агрегата 5-12" ПАО «Интерпайп НТЗ». Модернизация и реконструкция ТПА 5-12" позволит значительно продлить срок службы агрегата и улучшить его технико-экономические показатели. Внедрение технологии и оборудования для подготовки передних концов гильз является важнейшим перспективным мероприятием, обеспечивающим прирост объема производства ~ 12 тыс. тонн труб в год. В результате поэтапного внедрения мероприятий на ТПА 5-12" прирост производства составит 60-70 тыс. тонн труб в год.

Ключевые слова: труба, пилигримовый агрегат, модернизация, реконструкция.

Введение. Трубопрокатный цех с пилигримовым агрегатом 5-12" был построен по проекту Укргипромеза и технологическому заданию ВНИТИ (сейчас ГП «НИТИ» им. Я.Е. Осады).

Основное оборудование ТПА 5-12" было спроектировано Чепельским проектным институтом (Венгрия) и изготовлено на Чепельском машиностроительном заводе. Агрегат был пущен в декабре 1968 года и предназначен по проекту для производства обсадных труб и труб общего назначения, котельных труб диаметром 140-324 мм с толщиной стенки 8-60 мм. Проектная мощность агрегата в зависимости от сортамента должна была находиться в пределах 380-420 тыс. тонн труб в год. Из-за конструктивных недостатков поставленного оборудования, в основном это было связано с неудовлетворительной конструкцией подающих аппаратов, в период освоения проектная мощность не была достигнута. В последствие венгерские подающие аппараты были модернизированы с участием Института черной металлургии (г. Днепропетровск).

Проектная мощность агрегата была утверждена на уровне 330 тыс. тонн труб в год в сортаменте 1974 г. и достигнута в 1976 году.

В восьмидесятые годы прошлого столетия была проведена частичная модернизация оборудования ТПА 5-12" с участием венгерской стороны.

В мире имеется положительный опыт модернизации средних и больших пилигримовых агрегатов с переходом на непрерывнолитую заготовку, замену подающих аппаратов и автоматизацию процессов пилигримовой прокатки.

В этой связи замену пилигримового способа на непрерывный в условиях ПАО «Интерпайп НТЗ» следует считать не эффективной, так как такая замена не расширяет сортамент прокатываемых труб, а проведение поэтапной модернизации действующего агрегата 5-12" позволит существенно улучшить практически все технико-экономические показатели.

Постановка задачи. Представляет интерес анализ планировавшихся и частично проведенных ранее реконструктивных мероприятий на ТПА 5-12" с пилигримовыми станами НТЗ, т.к. эти вопросы продолжают оставаться актуальными и в настоящее время. Необходимо на основе анализа современного состояния ТПА 5-12" ПАО «Интерпайп НТЗ» определить рациональные границы его модернизации и реконструкции.

Изложение результатов работы. Анализ проекта реконструкции ТПА 5-12" НТЗ в рамках советско-венгерского сотрудничества Сотрудничество между СССР и Венгерской народной республикой (ВНР) в конце 70-х – начале 80-х годов прошлого столетия предусматривало проведение реконструктивных мероприятий на ТПА 5-12" Нижнеднепровского трубопрокатного завода (НТЗ) им. К. Либкнехта.

В рамках этого сотрудничества на ТПА 5-12" НТЗ намечалось осуществление следующих мероприятий:

- №1- Установка воздушных цилиндров подающего аппарата с системой синхронизации «валки-подающий аппарат».
- №2- Установка нового механизма подачи подающего аппарата комплектно с кареткой.
- №3- Реконструкция узлов главной линии пилигримового стана с заменой шпинделей, шестеренных клетей, предохранительных муфт, маховиков.
- №4- Модернизация участка внестановой зарядки гильз с возможностью использования водоохлаждаемого дорна.
- №5- Установка оборудования для подготовки передних концов гильз на стане-элонгаторе.

№6- Испытание опытного устройства для дистанционного управления главным дистрибутором подающего аппарата пилигримового стана.

В 1976 году объем производства труб на ТПА 5-12" НТЗ находился на уровне 330 тыс. т труб в год, что соответствовало уточненной проектной мощности в сортаменте 1974 года.

При проведении реконструктивных мероприятий на ТПА 5-12" НТЗ предусматривалось:

- модернизировать подающие аппараты, применив гидромеханическую систему стабилизации подачи металла в валки и усовершенствованную систему торможения подвижных масс;
- модернизировать систему внестановой зарядки для обеспечения вспомогательного времени прокатки не более 35 с;
- установить на выходной стороне стана – элонгатора устройство для обкатки передних концов гильз с целью сокращения времени затравки металла в валки пильгерстана и уменьшения массы отрезаемого затравочного конца трубы;
- применить безззорное шпиндельное соединение валков и шпинделей, новую конструкцию муфты предельного момента вместо брешшпинделя и шестеренные клетки на подшипниках качения, а также облегченные маховики пильгерстанов для обеспечения затравки металла и обкатки пильгерголовок на сниженных оборотах валков и прокатку при установившемся процессе на высоких оборотах.

Из перечисленных мероприятий полностью внедрили лишь модернизированный участок внестановой зарядки, на стане-элонгаторе установили оборудование для подготовки передних концов гильз и на пилигримовом стане № 1 установили облегченный маховик Ø 6500 мм (на пильгерстане № 2 оставили старый маховик Ø 8500 мм). Остальные мероприятия оказались конструктивно неработоспособными.

Позднее заменили пилигримовые клетки на более жесткие и станину стана- элонгатора.

Для обеспечения производства обсадных труб по ГОСТ 632-80 был установлен второй – пятиклетьевого калибровочный стан конструкции ПО «ЭЗТМ», который хорошо себя зарекомендовал в процессе эксплуатации и обеспечил выполнение требований ГОСТ 632-80.

В последующее время (почти за 40 лет) были усовершенствованы лишь отдельные узлы станов ТПА 5-12". В 2012 году была установлена пила фирмы

«Лизингер» (Австрия) для холодной порезки штанг непрерывнолитой заготовки (НЛЗ) круглого поперечного сечения.

Несмотря на относительно скромные масштабы проведенных реконструктивных мероприятий на ТПА-5-12" НТЗ в рамках советско-венгерского сотрудничества анализ планировавшихся проектных решений и неудач в их внедрении представляют интерес, так как многие проблемы имевшие место в начале 80-х годов прошлого столетия [1. 2] являются актуальными и в настоящее время.

Недостатки в работе прокатного оборудования ТПА 5-12" по проекту:

- конструкция узлов главной линии пилигримового стана характеризуется большими зазорами, раскрывающимися в каждом цикле прокатки, что приводит к значительным динамическим нагрузкам при увеличении числа оборотов валков и, как следствие, к преждевременному выходу из строя узлов главной линии;
- отсутствие эффективных предохранительных устройств в главной линии пилигримового стана приводит к повышенным простоям при поломке и замене действующих предохранительных устройств;
- существующий механизм подачи не обеспечивает стабильной подачи в каждом цикле прокатки. Значительный разброс подачи от цикла к циклу предопределяет необходимость прокатки с пониженной подачей. При таком неустойчивом процессе исключается также возможность контроля величины подачи – важнейшего параметра пилигримовой прокатки;
- отсутствуют работоспособные устройства для подготовки переднего конца гильзы;
- эстакада манипулятора участка внестановой зарядки гильз дорнами выполнена не жесткой. Кроме того, существующая конструкция эстакады затрудняет подъезд мостовых кранов к рабочим клетям пилигримовых станов и ограничивает обзор с рабочего места вальцовщика. Решетка для передачи гильз на позицию зарядки затрудняет обслуживание рольганга от элонгатора. Недостатки конструкции оборудования участка внестановой зарядки гильз дорнами приводят к повышенным простоям участка и, как следствие, к увеличению вспомогательного времени прокатки.

Технические решения для модернизации ТПА 5-12" НТЗ. Для устранения вышеуказанных недостатков в процессе советско-венгерского сотрудничества были созданы новые конструкции отдельных узлов и агрегатов, которые

должны были повысить число оборотов валков пилигримового стана, уменьшить вспомогательное и машинное время прокатки, а также улучшить качество выпускаемых труб.

В соответствии с этим предусматривалось внедрение следующих мероприятий.

Установка воздушных цилиндров новой конструкции подающих аппаратов. Быстроходный воздушный цилиндр с гидропневматическим торможением и постоянным осевым подпором воздуха на плунжер и добавочным воздухом должен был обеспечить прокатку труб с максимальным числом оборотов валков до 100 в минуту.

Новая конструкция гидропневматического тормоза должна была позволить тормозить подвижные массы аппарата с максимально допустимым ускорением по всей длине тормозного пути.

Быстроходность воздушного цилиндра должна была обеспечиваться специальной системой автоматической синхронизации «валки – подающий аппарат».

Основные узлы воздушного цилиндра имели увеличенные на 50 % по сравнению с существующими запасы прочности. В конструкции отдельных элементов применены новые износостойкие материалы.

Воздушный цилиндр был создан на базе имеющегося опыта исследований, конструирования и эксплуатации. Цилиндр устанавливается в специальную каретку подачи. Дополнительных трубопроводов и переделок стана не требуется.

Установка нового механизма подачи. Для устранения разброса подачи при пильгеровании, снижающего производительность пильгерстана и являющегося также одной из причин перегрузки главной линии, был создан специальный электрогидравлический винтовой механизм подачи, в котором подача в каждом цикле пильгерования осуществляется с помощью винтового механизма, а извлечение дорна из раската и транспортные операции – с помощью гидроцилиндров. Точность работы механизма по техпроекту ± 1 мм подачи.

Наличие винтового механизма с электроприводом позволяет изменить величину подачи в широких пределах и в каждый момент времени точно определяет ее величину. Параметры механизма подачи и воздушного цилиндра выбраны таким образом, что их совместная работа производилась в дорезонансном режиме.

Механизм подачи в случае каких-либо неполадок позволяет осуществить работу пилигримового стана по существующей схеме.

При установке нового механизма подачи на стан требуется дополнительная секция станины, которая поставляется комплектно с механизмом подачи. Станина может быть смонтирована без остановки стана.

Учитывая, что при существующем механизме подачи разброс подачи составляет $\pm 10\%$, фактическую подачу держат на 10% ниже номинальной во избежание ухудшения качества труб.

При работе на оборотах до 100 в минуту для труб \varnothing 6-9" требуется снижение величины подачи на 10%. Однако, учитывая стабильность подачи, обеспечиваемую новым механизмом, ее можно понизить только на 5% при увеличении числа оборотов валков; для труб свыше 9" подача сохраняется на существующих параметрах.

Реконструкция узлов главной линии пилигримового стана. При разработке окончательного варианта главной линии была сохранена классическая схема: двигатель, маховик, предохранительное устройство (брехшпиндель), шестеренная клеть, приводные шпиндели, валки пилигримовой клетки.

Однако, в конструкцию отдельных элементов схемы, внесены существенные конструктивные изменения.

Маховик в существующих конструкциях пильгерстанов изготовлен из отдельных элементов – обод (4 части), спицы, ступица. В техническом рабочем проекте маховик выполнен из трех частей: ступица, обод и цельный диск, что намного повышает его надежность. Кроме того, маховый момент маховика равен маховому моменту существующего маховика.

Шестеренная клеть при прокатке в форсированном режиме подвергается действию значительных динамических и статических нагрузок. С целью увеличения надежности работы согласно проекту она выполнена на подшипниках качения.

В проекте главной линии пришлось отказаться от традиционной конструкции приводного шпинделя пильгерстана с тrefовыми соединениями, так как значительные зазоры являются источником больших динамических нагрузок.

В проекте приводных шпинделей в качестве шарнирного соединения использован шарнир Гука.

В конструкции главной линии предусмотрены эффективные, легко восстанавливаемые предохранительные муфты со срезными пальцами.

Предусматривается система управления главным двигателем, позволяющая вести процесс пилигримовой прокатки с переменным числом оборотов валков по длине гильзы. При этом управляющие сигналы передаются в систему синхронизации «валки – подающий аппарат» и систему управления приводом механизма подачи.

Шестеренная клеть и маховик устанавливаются на существующие фундаменты.

Указанные мероприятия позволяют реализовать возможности воздушного цилиндра подающего аппарата по увеличению поля оборотов валков пилигримового стана до 100 в минуту.

Модернизация участка внестановой зарядки гильз дорнами. Для повышения надежности работы узлов участка эстакада манипулятора для каждой клетки выполняется отдельной с консолью. При этом улучшается видимость и условия обслуживания клеток пилигримового стана.

Снижение простоев механизмов внестановой зарядки дорнов позволяет достичь вспомогательного времени прокатки 30,5 с, вместо среднего значения 35 с, достигнутого ранее.

Использование водоохлаждаемого дорна. Наряду с внестановой зарядкой гильз дорнами предусматривалась возможность использования водоохлаждаемого дорна новой конструкции.

Предлагаемая конструкция водоохлаждаемого дорна имеет следующие преимущества: наличие быстроразъемного соединения (хвостовик в Т-образном пазу, установленный с зазорами) обеспечивает нормальную работу стана при отсутствии настройки каретки аппарата по оси прокатки; применение направляющего ролика, катящегося в специальном пазу желоба, упрощает и облегчает конструкцию, а также уменьшает износ направляющих; сброс воды непосредственно под желоб аппарата позволяет ограничиться одним гибким подводом, что улучшает обзор вальцовщику и сокращает время на замену дорна; применение гибкого подвода, состоящего из трех шлангов, более короткого троса, принимающего на себя нагрузки, и двух накидных гаек, обеспечивает бесперебойное охлаждение дорна при больших динамических нагрузках.

Опытная и полупромышленные конструкции водоохлаждаемого дорна прошли успешные испытания и доводку на пилигримовом стане 6-12" завода им.К.Либкнехта. Водоохлаждаемый дорн обеспечивает снижение вспомогательного времени по сравнению с зарядкой обычного дорна в линии стана, однако по сравнению с внестановой зарядкой дорнов вспомогательное

время увеличивается, что приводит к снижению производительности по сравнению с вариантом внестановой зарядки на 1-2%. Использование водоохлаждаемого дорна обеспечивает повышение в 1,5-2,0% раза стойкость дорнов, а также точности труб по толщине стенки. Применение водоохлаждаемого дорна целесообразно для тонкостенных труб при большом диаметре дорна.

Установка оборудования для подготовки переднего конца гильзы. Обкатка переднего конца гильзы на стане элонгаторе ТПА 5-12" может производиться инструментом трения (матрицы) или качения (холостые валки). После обработки конца гильзы определенной длины инструмент (матрицы или валки) разводится и пропускает гильзу.

При создании новой конструкции учитывался опыт эксплуатации установки для подготовки переднего конца гильзы холостыми валками на прошивном косовалковом стане ТПА 6-12" завода им. К. Либкнехта и ТПА 6-12" Чепельского трубного завода при подготовке переднего конца гильзы матрицами.

В обработанный передний конец гильзы дорн задается с натягом, что не позволяет гильзе скользить по дорну во время затравки и обеспечивает возможность осуществления процесса прокатки на максимальных оборотах валков пилигримового стана. Кроме того, затравка осуществляется за меньшее количество ударов. Коэффициент затравки снижается в среднем на 60-70%. Затравочный конец трубы при этом получается значительно лучшего качества, что приводит к снижению расходного коэффициента металла на 0,5%.

Были предусмотрены два варианта проведения реконструкции ТПА 5-12" в ТПЦ № 4 Нижнеднепровского трубопрокатного завода.

Первый вариант предусматривает осуществление всех реконструктивных мероприятий рассмотренных выше. Основные показатели при осуществлении реконструкции ТПА 5-12" по I варианту приведены в таблице 2. При этом работа пилигримовых станов предусматривается на максимально возможных числах оборотов валков на протяжении всего цикла прокатки. Процесс затравки на максимальных числах оборотов валков осуществляется за счет прижатия обработанного конца гильзы к дорну и облегчения условий захвата гильзы валками.

Прирост по сравнению с проектной мощностью (330 тыс. т труб в год) составляет около 74 тыс. т труб в год (табл. 1).

Таблица 1. Основные показатели при осуществлении реконструкции ТПА 5-12" Нижнеднепровского трубопрокатного завода по I варианту

Номер мероприятия по реконструкции	I вариант				I этап			
	оборудование			прирост производства, тыс. т	оборудование			прирост производства, тыс. т
	количество	вес, т	общий вес, т		количество	вес, т	общий вес, т	
1	2	39,2	78,4		1	39,2	39,2	
То же без системы синхронизации	3	38,0	114		2	38,0	76,0	
2	2	80	160		1	80,0	80,0	
3								
в том числе:								
- шпиндели	8	8,6	68,8		4	8,6	34,4	
- шестеренная клеть	2	104,0	208,0		1	104,0	104,0	
- предохранительная муфта	4	15,4	61,6		2	15,4	30,8	
- маховик	2	82,0	164,0		1	82,0	82,0	
4	1	194,0	194,0		1	194,0	194,0	
5	1	19,0	19,0		1	19,0	19,0	
6	2	4,0	8,0		1	4,0	4,0	
Итого			1075,8	74			663,4	30

Реконструктивные мероприятия предполагалось осуществить в два этапа. На *первом этапе* предусматривалась установка опытно-промышленных образцов воздушного цилиндра, механизма подачи, узлов главной линии пилигримового стана и модернизации участка внестановой зарядки гильз дорнами с возможностью использования водоохлаждаемого дорна. Установка оборудования подготовки переднего конца гильз и модернизация участка внестановой зарядки гильз дорнами обеспечивает работу двух клетей пилигримового стана с новыми параметрами. Увеличение объема производства по сравнению с проектной мощностью составляет около 45 тыс. т труб в год. *Второй этап* (полная реконструкция по первому варианту) осуществляется после получения положительных результатов испытания и освоения опытно-промышленных образцов оборудования. Увеличение объема производства при сооружении только установки для подготовки переднего конца гильз по сравнению с проектной мощностью составляет 12 тыс. т труб в год. При внедрении в производство установки для подготовки переднего конца гильзы,

подающих аппаратов новой конструкции и модернизации узлов главной линии пилигримового стана увеличение объема производства по сравнению с проектной мощностью составляет 67500 т труб в год. Увеличение объема производства по сравнению с проектной мощностью при внедрении мероприятий по модернизации участка внестановой зарядки гильз дорнами составляет 7800 т труб в год.

Второй вариант предусматривал осуществление полного комплекса мероприятий без подготовки переднего конца гильзы. Основные показатели при осуществлении реконструкции ТПА 5-12" по II варианту приведены в табл. 2.

Таблица 2. Основные показатели при осуществлении реконструкции ТПА 5-12" Нижнеднепровского трубопрокатного завода по II варианту

Номер мероприятия по реконструкции	II вариант				II этап			
	оборудование			прирост производства, тыс. т	оборудование			прирост производства, тыс. т
	количество	вес, т	общий вес, т		количество	вес, т	общий вес, т	
1	2	39,2	78,4		1	39,2	39,2	
То же без системы синхронизации	3	38,0	114,0		2	38,0	76,0	
2	2	80,0	160,0		1	80,0	80,0	
3								
в том числе:								
– шпиндели	8	8,6	68,8		4	8,6	34,4	
- шестеренная клеть	2	104,0	208,0		1	104,0	104,0	
– предохранительная муфта	4	15,4	61,6		2	15,4	30,8	
– маховик	2	82,0	164,0		1	82,0	82,0	
4	1	194,0	194,0		1	194,0	194,0	
5	-	-	-		-	-	-	
6	2	4,0	8,0		1	4,0	4,0	
Итого			1056,8	60,0			644,4	39

Таким образом, при установке на ТПА 5-12" нового технологического оборудования общим весом около 1100 т может быть обеспечен прирост производства примерно на 60-75 тыс. т труб в год, в том числе на первом этапе

при весе опытных образцов оборудования около 660 т прирост производства составит около 39-45 тыс. т труб в год.

Современное состояние оборудования ТПА 5-12" ПАО «Интерпайп НТЗ» и пути его модернизации. На рисунке приведена современная схема расположения оборудования ТПА 5-12" цеха нефтегазового сортамента.

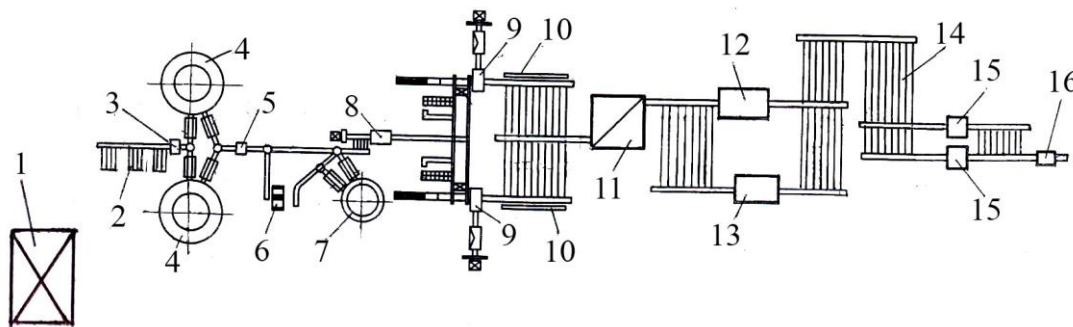


Рис. – Расположение оборудования ТПА 5-12” на участке проката цеха нефтегазового сортамента: 1-пила для резки штанг НЛЗ; 2-стеллажи загрузки заготовки; 3-весы; 4 -кольцевая нагревательная печь; 5-установка гидросбива окалины; 6-прошивной гидравлический пресс усилием 20МН; 7-кольцевая подогревательная печь; 8-стан-элонгатор; 9-пилигримовый стан; 10-участок огневой резки труб; 11-подогревательная печь (ПШБ); 12 -12-ти клетьевого калибровочный стан; 13-5-ти клетьевого калибровочный стан; 14-холодильник; 15-правильная машина; 16-установка выдувки окалины.

Прошивной пресс. Неудовлетворительная осевая центровка шабота и прошивного пуансона, приводящая к повышенной разностенности стакана.

Стан-элонгатор. Невозможность регулирования угла подачи валков из-за отсутствия подушек с переменным углом подачи согласно проекту.

Отсутствие центрователя стержня оправки, что не позволяет прокатывать гильзы на оправках диаметром менее 150 мм из-за продольного изгиба стержней.

Отсутствие механизма регулирования положения по высоте нижнего линейно-держателя с направляющей линейкой, что приводит к нарушению положения оси прокатки и изгибу тонких стержней. Оборудование стана-элонгатора морально и физически устарело и требует замены или установки нового более мощного прошивного стана (элонгатора).

Пильгерстаны. Неудовлетворительная (устаревшая) конструкция подающих аппаратов, что не обеспечивает стабильной подачи металла в валки, приводит к перекантовке гильзы в каждом цикле на 25-30° от положенных 90° (увеличивается поперечная разностенность труб); низкие обороты валков пильгерстана вследствие значительной динамики и перегрева подшипников скольжения главной линии стана.

В результате длительного времени прокатки (до 5-6 мин. вместо допустимого в 3 мин.) наблюдается повышенная разнотолщинность по длине плети и быстрый износ трубопрокатного инструмента.

Калибровочные станы. Отсутствует удаление окалины с наружной поверхности труб после их подогрева в ПШБ перед калиброванием.

Устаревшая конструкция 12-ти клетового стана не обеспечивает точную настройку стана. Отсутствие калибровочного стана в термоотделе усугубляет трудности при получении требуемого диаметра труб.

Основные направления модернизации участка горячего проката ТПА 5-12" ПАО «Интерпайп НТЗ» в современных условиях. Проведенный анализ современного состояния оборудования ТПА 5-12" позволяет наметить основные мероприятия для поэтапного проведения модернизации агрегата. Вопросы модернизации главной линии пилигримовых станов в настоящем анализе не рассматриваются, хотя и продолжают оставаться актуальными. Это связано с отсутствием проверенных технических решений по этим вопросам.

Из-за низкого качества исходного металла – слитков мартеновского производства ранее вынуждены были перейти на прокатку труб в калибровочных станах с малыми обжатиями по диаметру, что способствовало также уменьшению искривления передних концов труб. В результате этого для каждого размера труб по диаметру потребовались отдельные валки пильгерстана и большое количество клетей калибровочных станов. Из-за этого резко увеличился парк оправок элонгатора, пильгервалков, дорнов и валков калибровочных станов. Следствием явилась необходимость частой перестройки элонгатора, пильгерстанов, калибровочных станов, что привело к снижению производительности ТПА 5-12".

Вследствие перехода на прокатку труб из непрерывнолитой заготовки, качество которой значительно выше качества мартеновского слитка необходимо рассмотреть возможность изменения технологии с увеличением обжатия на калибровочных станах в 2 раза, что позволит сократить парк прокатного инструмента и снизить потери времени на перенастройку станов.

При существующей специализации ТПА 5-12" на прокатке труб из углеродистых и низколегированных сталей целесообразен переход на прямую прошивку гильз из круглой непрерывнолитой заготовки.

Для этого необходимо:

- заменить стан-элонгатор на более современный прошивной стан;

- восстановить прямой рольганг от нагревательных печей КП № 1 и КП № 2 к существующему стану-элонгатору, обеспечив увеличение скорости передачи заготовок и снижение потери их температуры при транспортировке путем теплоизоляции рольганга. При этом выводятся из технологии прошивной пресс усилием 2000 т и подогревательная кольцевая печь № 3. Это позволит получить существенный экономический эффект, прежде всего за счет экономии газа. Такая технология внедрена на ТПА 5-12" Северского трубного завода (г. Полевское, Свердловская область, Россия).

В случае расширения сортамента прокатываемых труб из легированных и высоколегированных сталей (например, котельных) целесообразно сохранить прошивной пресс усилием 20 МН для прошивки сплошных и экспандирования полых (сверленных) слитков, кованных заготовок и непрерывнолитых заготовок (круглого и восьмигранного сечения), а также подогревательную печь № 3 для выравнивания температуры стаканов после прошивного пресса. При этом прошивной пресс необходимо модернизировать для устранения отмеченных выше недостатков в его работе.

На пилигримовых станах основным мероприятием по повышению производительности и улучшению качества труб является замена устаревших подающих аппаратов на аппараты современной конструкции (Германии и Италии).

Необходимо оснащение пильгерстанов системами контроля толщины стенки прокатываемых труб для оперативного управления станами в процессе прокатки с целью снижения продольной и поперечной разностенности.

Целесообразно разработать оборудование для подготовки передних концов гильз перед пилигримовой прокаткой. Опыт использования такой технологии на ТПА 6-12" и 5-12" Нижнеднепровского трубопрокатного завода более 30 лет назад показал ее высокую эффективность. Использование такой технологии, когда длина подготовленного переднего конца гильзы составляет примерно половину длины развертки бойка пилигримового вала, позволяет по расчетам Укрگیпромеза получить прирост производства в 12 тысяч тонн труб в год.

Необходимо перейти на технологию более полной раскатки пилигримовой головки (практически без цилиндрического пояса) за счет изменения конструкции дорнового устройства. Положительные результаты достигнуты в этом вопросе на ТПА 5-12" при прокатке тонкостенных труб. Это

подтверждается также результатами внедрения такой технологии на Северском трубном заводе.

Целесообразно заменить существующую огневую резку на пилы ударного действия, которые применяются на ТПА с пильгерстанами за рубежом. Это обеспечит улучшение раскроя прокатанной плети на мерные части, снизит безвозвратные потери металла при огневой резке, позволит сохранить в большей степени температуру труб перед ПШБ.

Необходимо спроектировать и установить обводной рольганг за ПШБ для пропуска толстостенных труб ($S > 22$ мм) мимо печи, что позволит разгрузить электромостовые краны.

Дополнительные мероприятия: провести модернизацию печи ПШБ с предварительным изучением всех недостатков в работе ее механизмов; установить гидравлические окалиноломатели перед калибровочными станами для улучшения качества наружной поверхности труб; приобрести необходимое по расчету число запасных клеток 12-ти клетевго калибровочного стана (~ 20 клеток), а также подушек валков (~ 50 штук). Для нарезки ручьев на валках необходимо приобрести специальный вальцетокарный станок; для улучшения работы 5-ти клетевго калибровочного стана необходимо приобрести дополнительное количество регулируемых клеток (~ 15 штук); установить в термоотделе новый 3-5 клетевой калибровочный стан, что позволит повысить точность диаметра труб по их длине; установить измерители наружного диаметра и толщины стенки труб перед подачей их на холодильник, что исключит необходимость отбора проб и сократит потери металла; для точного учета веса металла после проката за механизмом выдувки окалины необходимо установить оборудование для маркировки труб, весы для поштучного взвешивания и измеритель длины последних с автоматическим занесением данных в компьютер.

Выводы:

1. Построенный по проекту Укрگیпромеза и технологическому заданию ВНИТИ трубопрокатный цех с пилигримовым станом 5-12" ПАО «Інтерпайп НТЗ» за весь период работы с 1969 по настоящее время произвел более 12 млн. тонн труб.

2. Анализ проведенных ранее реконструктивных мероприятий позволяет более обоснованно подойти к планированию модернизации оборудования ТПА 5-12" в современных условиях.

3. Поэтапное проведение модернизации и реконструкции ТПА 5-12" с учетом мирового опыта и отечественных разработок позволит значительно продлить срок службы агрегата и улучшить его технико-экономические показатели.

4. Внедрение технологии и оборудования для подготовки передних концов гильз является важнейшим перспективным мероприятием, обеспечивающим прирост объема производства ~ 12 тыс. тонн труб в год.

5. В результате поэтапного внедрения реконструктивных мероприятий на ТПА 5-12" прирост производства составит 60-70 тыс. тонн труб в год.

Список литературы: 1. *Королев А.А.* Конструкции и расчет машин и механизмов прокатных станов. – М.: Металлургия, 1985. – 376 с. 2. *Королев А.А.* Механическое оборудование прокатных и трубных цехов. – М.: Металлургия, 1987. – 480 с.

Поступила в редакцию 30.01.2014

УДК 621.923

Р. М. СТРЕЛЬЧУК, канд. техн. наук, стар. препод., ХНЭУ, Харьков

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ПЛОСКОГО ШЛИФОВАНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ВЛИЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

При обработке деталей на шлифовальных станках часто возникают колебания, которые ухудшают работу станков, снижают точность, увеличивают шероховатость и волнистость обработанной поверхности, что приводит к увеличению износа инструмента. Исходя из этого, предложен расчетно-экспериментальный метод определения границ области устойчивой работы шлифовальных станков. В работе установлено, что высокоскоростное шлифование сталей и сплавов кругами из эльбора и электрокорунда можно рассматривать главным образом как средство повышения производительности обработки.

Ключевые слова: процесс шлифования, глубина и ширина срезаемого слоя, скорость резания, расчетная производительность станка.

Введение. Одним из наиболее перспективных направлений повышения эффективности операций шлифования и расширения его технологических возможностей является изменение скорости резания, задаваемой частотой вращения круга. Широкое внедрение высокоскоростного шлифования в производство сдерживается, главным образом, недостаточной изученностью технологии этого процесса и отсутствием обоснованных технологических рекомендаций по способу его ведения, выбору режима резания, характеристики инструмента и разработки рациональных рабочих циклов шлифования.

Задача исследования. Решить данную задачу можно на основе анализа физико-механических, теплофизических и динамических условий, сопровождающих процесс шлифования, на основе достоверного математического моделировании этого процесса и его выходных характеристик, а также путем применения современных методов оптимизации процесса шлифования.

Проанализированы проблемы, связанные с динамическими исследованиями технологической системы плоскошлифовальных станков. В качестве основного объекта исследования выбрано шпиндельное устройство как сложная динамическая система.

Основные особенности динамической системы станка заключаются в ее замкнутости и многоконтурности, рабочие процессы взаимосвязаны друг с другом через упругую систему, причем обратным влиянием упругой системы на рабочие процессы, как правило, пренебречь нельзя. Однако, в отдельных случаях, учитывая только наиболее существенные обратные связи, можно перейти к представлению об эквивалентной динамической системе станка как об одноконтурной системе (рис. 1).

Свойства элемента контура можно определить, если известны параметры его динамических характеристик. Для шпиндельного устройства шлифовальных станков это коэффициенты матриц A , B , C , где A – коэффициент квазиупругой системы, B – коэффициент диссипативной системы, C – коэффициент инерционной системы.



Рис. 1– Станок и процесс резания, как замкнутый контур

Процесс шлифования, как элемент динамической системы, представляет собой сложную систему, свойства которой зависят от характеристики абразивного инструмента, режимов резания, свойств обрабатываемого материала, применяемых СОТС и др.

Методы исследований. Метод исследования виброустойчивости станков с помощью частотного критерия устойчивости основан на определении АФЧХ шпиндельного устройства станка. Оценка виброустойчивости станка

осуществляется путем построения областей устойчивости, а именно определяется зависимостью глубины шлифования или средней ширины стружки, снимаемой в процессе шлифования без вибраций (V_c), от скорости резания.

Алгоритм построения АФЧХ:

- находится коэффициент A_i ;
- подсчитываются линеаризованные коэффициенты вязкого трения B_j ;
- определяются коэффициенты матрицы демпфирования V_{ij} ;
- вычисляются коэффициенты h_k ;
- находится A_k ;
- определяется АФЧХ.

Алгоритм основан на алгоритме вычисления свободных колебаний. Элементы упругой системы, колебания которых превалируют в относительных колебаниях на той или иной частоте, выявляются путем построения форм колебаний на основании данных о величине абсолютных смещений элементов станка в определенный момент времени. Расчет показал, что основная доля статической податливости станка модели 3Г71М приходится на шпиндель (44%), подшипник шпинделя (21%), консоль шпиндельной бабки (14%) и механизм вертикальной подачи (15%).

На частоте 125 Гц преобладают вертикальные колебания шлифовальной бабки, обусловленные податливостью механизма вертикальной подачи. Относительные колебания с частотой 290 Гц определяются главным образом податливостью шпинделя и подшипников. Этой частоте соответствует первая форма известных колебаний шпинделя. Частота 480 Гц характеризуется значительными угловыми колебаниями планшайбы с кругом; они почти целиком обусловлены податливостью шпинделя и контакта его с планшайбой круга и соответствует второй форме изгибных колебаний.

Для проверки результатов расчета динамические характеристики станка модели 3Г71М определены экспериментально. При сравнении результатов расчета и эксперимента для более высоких частот следует иметь в виду, что параметры опор шпинделя определяем по формулам для гидродинамического подшипника, тогда как в экспериментах демпфирование было иным, поскольку шпиндель не вращался.

Рассчитаны также относительные колебания станка при силовых возмущениях от электродвигателя привода круга и при колебаниях

фундамента. Колебания станка от действия дисбаланса шлифовального круга фактически определены при расчете АФЧХ относительных колебаний станка (рис.2), поскольку влияние стола на относительные вертикальные колебания незначительны (менее 10%).

При расчете реакции станка на возмущения от электродвигателя привода круга учитывались частоты этих возмущений, которые обычно соответствуют частоте вращения ротора (влияние дисбаланса), двойной оборотной частоте (влияние овальности опорных шеек якоря и несимметричности его обмоток), двойной частоте сети (влияние неравномерности магнитного зазора между якорем и статором) и др.

Результаты исследований. Известно, что установившееся резание может протекать в трех режимах:

- спокойное, при отсутствии колебаний;
- спокойное, с небольшими колебаниями, образующими на обработанной поверхности некоторую волнистость;
- с недопустимыми вибрациями.

Первый режим соответствует области устойчивого равновесного состояния, а остальные – предельным циклам двух видов. Выявление параметров системы, позволяющих реализовать устойчивые предельные циклы с заданной амплитудой, не только имеет теоретическое значение, но и дает возможность повысить расчетную производительность станков в области спокойного резания при допустимой волнистости обрабатываемой поверхности.

Для того чтобы построить граничную кривую в плоскости параметров t или V_c (глубина шлифования или средняя ширина срезаемой стружки) и V_k (скорость резания), достаточно воспользоваться известным в теории регулирования методом Д-разбиения и выяснить границу областей устойчивости системы, обеспечивая некоторое ее удаление от этой границы [1, 2]. Полученная кривая (рис. 3) и будет границей области устойчивого шлифования.

Предложенный метод определения областей устойчивости при шлифовании позволяет еще на этапе проектирования станка, а также при разработке технологических процессов (расчете режимов резания) механической обработки, прогнозировать и достаточно достоверно определять зону, в которой обработка будет вестись наилучшим образом.

Выявление параметров системы, позволяющих реализовать устойчивые предельные циклы с заданной амплитудой, не только имеет теоретическое значение, но и дает возможность повысить расчетную производительность станков в области «спокойного» резания при допустимой волнистости обрабатываемой поверхности.

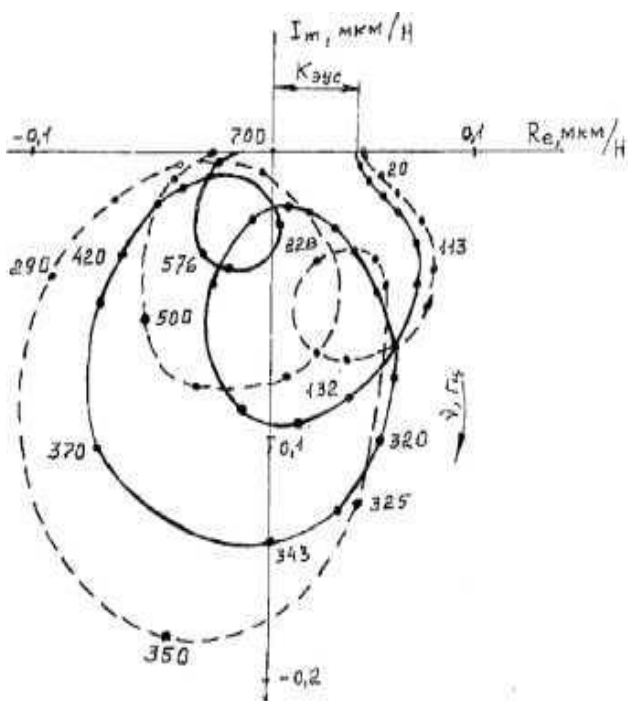


Рис. 2 – АФЧХ ЭУС станка 3Г71М:
сплошная линия – расчетная,
штриховая – эксперимент
Статическая податливость станка $K_{эус} = 0,049$ мкм/Н,
резонансные частоты 132 Гц, 346 Гц, 576 Гц

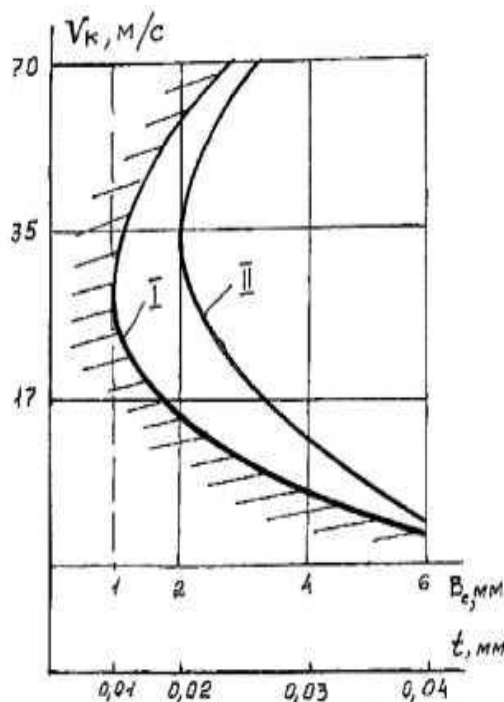


Рис.3 – Кривая границ устойчивого
шлифования: I – станок 3Г71М,
II – станок 3Е711ИВ

Интенсификация процесса шлифования возможна лишь при условии выбора рациональных соотношений между скоростью резания и другими параметрами обработки, которые при наибольшей эффективности позволяют получить требуемое качество металла поверхностного слоя заготовок и заданную точность размеров.

Увеличение скорости резания при шлифовании производится с целью повышения производительности обработки и уменьшения расхода абразивных и эльборовых кругов. Производительность процесса шлифования можно оценить величиной $Q_{уд}$ – скорость съема металла на единицу высоты круга. Увеличение скорости с 25-30 м/с до 70 м/с позволяет в 2-3 раза увеличить скорость съема металла и тем самым значительно повысить

производительность процесса обработки. Повышение скорости круга с 30-35 м/с до 70 м/с обеспечивает уменьшение основного времени на обработку партии заготовок в среднем в 3-3,5 раза. Если принять, что составляющие штучно-калькуляционного времени остаются неизменными или изменяются незначительно можно утверждать, что увеличение скорости круга при шлифовании обеспечивает повышение производительности труда не менее чем в 2 раза.

Вывод. Таким образом, высокоскоростное шлифование сталей и сплавов кругами из эльбора и электрокорунда можно рассматривать главным образом как средство повышения производительности обработки.

Список литературы: 1. Эльясберг М.Е. Автоколебания металлорежущих станков. СПб.: изд. ОКБС. 1993. 2. Зубарев Ю.М. Расчет шпиндельных устройств станка на устойчивость резания./ Зубарев Ю.М., Агаркова Н.Н., Сикалова М.А. Физические процессы при резании металлов. – Сб. н.р. Волгоград-Ижевск. Изд ВолгГТУ, Волгоград, 1997. – С. 114 – 119.

Поступила в редакцию 30.01.2014

УДК 621.9.048.4, 620.179.14

Ю. В. ХОМЯК, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»

ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ДЕФЕКТОВ

Проведен анализ распространенных методов и средств электроэрозионной металлообработки. Изучены их особенности для изготовления моделей дефектов для исследований вихретоковых средств контроля. Разработана и изготовлена установка для изготовления искусственных дефектов металлических образцов. Описана работа электронной схемы генератора импульсов, установлено, что приемлемый режим обработки, при котором процесс электроэрозии протекает устойчиво при длительности импульсов – 1,5-3 мкс, частоте следования – 20-40 кГц, амплитуде – 200 В.

Ключевые слова: вихретоковая дефектоскопия, искусственный дефект, электроэрозионная обработка, преобразователь, импульс, транзистор.

Введение. Для настройки и определения параметров вихретоковых преобразователей в составе дефектоскопов необходимы металлические образцы которые имеют искусственные поверхностные несплошности [1]. Геометрические параметры моделей дефектов должны удовлетворять требованиям лабораторных исследований. Их особенность в том, что они должны иметь различную глубину, протяженность, раскрытие и т.п. с заданными значениями и допусками. Следовательно, потребность вихретоковой дефектоскопии в образцах, которые имеют искусственные дефекты, вызывает необходимость создания средств их изготовления.

© Ю. В. Хомяк, 2014

Основная часть. Целью данной работы является разработка электроэрозионной установки для изготовления моделей дефектов.

Для изготовления стандартных образцов могут применяться различные методы и технологии обработки металлов [2,3], среди них следует выделить электроэрозионный способ. Под электроэрозионной обработкой понимают обработку металлов с использованием электрической эрозии, возникающей при организации импульсного разряда между обрабатываемой деталью и специальным электродом-инструментом. Электроэрозионная обработка производится с целью придания детали требуемой формы (размерная обработка), упрочнения поверхности или нанесения на нее защитного покрытия.

Различают два вида электроэрозионной обработки: электроискровую и электроимпульсную.

Электроискровая обработка производится короткими импульсами тока (менее 100 мкс). Условно такие разряды называют искровыми, из чего следует и название обработки.

Электроимпульсная обработка характеризуется более длительными импульсами тока (более 100 мкс), при которых разряд по своим характеристикам приближается к дуговому: с характерными зонами и столбом канала, для которого характерны малые градиенты напряжения.

Принцип реализации электроэрозионной обработки основан на тепловом действии канала разряда на обрабатываемую деталь. В канале разряда, включая приэлектродную зону, за короткое время выделяется энергия, нагревая газовую среду канала (в основном пары металла) до температуры в несколько тысяч градусов. За счет теплопроводности из зоны разряда формируется тепловой поток, который быстро нагревает непосредственно примыкающий к месту разряда металл заготовки, плавит и частично испаряет некоторое количество металла, образуя эрозионную лунку. Для организации разряда с нужными параметрами и эвакуации продуктов эрозии (пара и частиц расплавленного металла) разряд производится в технологической жидкости (керосин, масло, вода).

Главными преимуществами электроэрозионной обработки являются возможность обработки металлов с любой прочностью, включая высокопрочные сплавы, а также возможность изготовления отверстий, линий разреза сложной конфигурации.

Для изготовления образцов с поверхностными искусственными дефектами (рис. 1), опираясь на опыт, описанный в работах [4-11], была разработана электроэрозионная установка (рис.2). Она состоит из штатива 1, прикрепленного к основанию 2. Ванна 3 служит для погружения детали 4 в рабочую жидкость (дистиллированная вода). Электрод-инструмент крепится в электрододержателе 5 и подается при помощи регулировочных винтов 6. Перемещение электрода-инструмента оценивается по шкале с нониусом 7. Деталь фиксируется специальной магнитной системой. В качестве электродов-инструментов применяется медная фольга различной толщины.



Рис. 1 – Внешний вид модели поверхностного дефекта изготовленного с помощью разработанной электроэрозионной установки

Образец, в котором необходимо сделать искусственный дефект, помещается в ванну и фиксируется магнитной системой. Ванна и образец имеют электрический контакт с электронным блоком установки. После фиксации металлического образца выставляется начальное положение электрода-инструмента. Последний выбирается с учетом требуемой модели дефекта. После заполнения ванны дистиллированной водой осуществляется включение генератора импульсов. При этом, должен отсутствовать контакт между образцом и электродом-инструментом. Медленным вращением винта вертикальной подачи осуществляется регулировка межэлектродного промежутка для устойчивого возникновения электроразрядного процесса. Регулировка длится необходимое время, обусловленное глубиной искусственного дефекта. Если происходит залипание электрода-инструмента в образованной полости процесс искрообразования прекращается и необходимо его отведение от детали. Оценка полученной глубины паза производится путем выведения электрода-инструмента до поверхности образца при выключенном

генераторе импульсов. При необходимости производится смена рабочей жидкости. Для улучшения процесса электроэрозионной прошивки должна быть обеспечена циркуляция дистиллированной воды в межэлектродном промежутке.

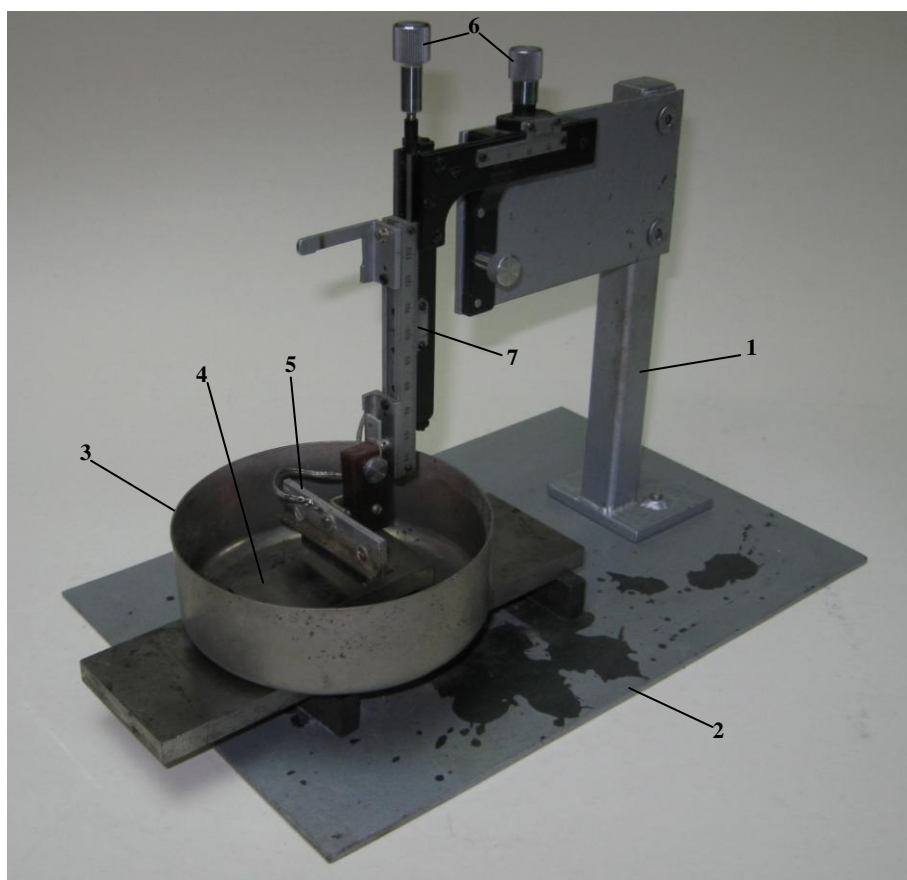


Рис. 2 – Электроэрозионная установка:
1 – штатив; 2 – стол; 3 – ванна; 4 – деталь;
5 – электрододержатель; 6 – винты вертикальной и
горизонтальной подачи; 7 – шкала с нониусом

Электронный блок электроэрозионной установки вырабатывает импульсы длительностью $1 \div 5$ мкс и частотой следования $0,1 \div 50$ кГц (задается внешним генератором, например, Г5-54). Амплитуда импульсов задается напряжением питания ($50 \div 310$ В).

Схема электронного блока электроэрозионной установки состоит из схемы управления (рис. 3, а) и схемы преобразователя (рис. 3, б), построенных с применением современной элементной базы.

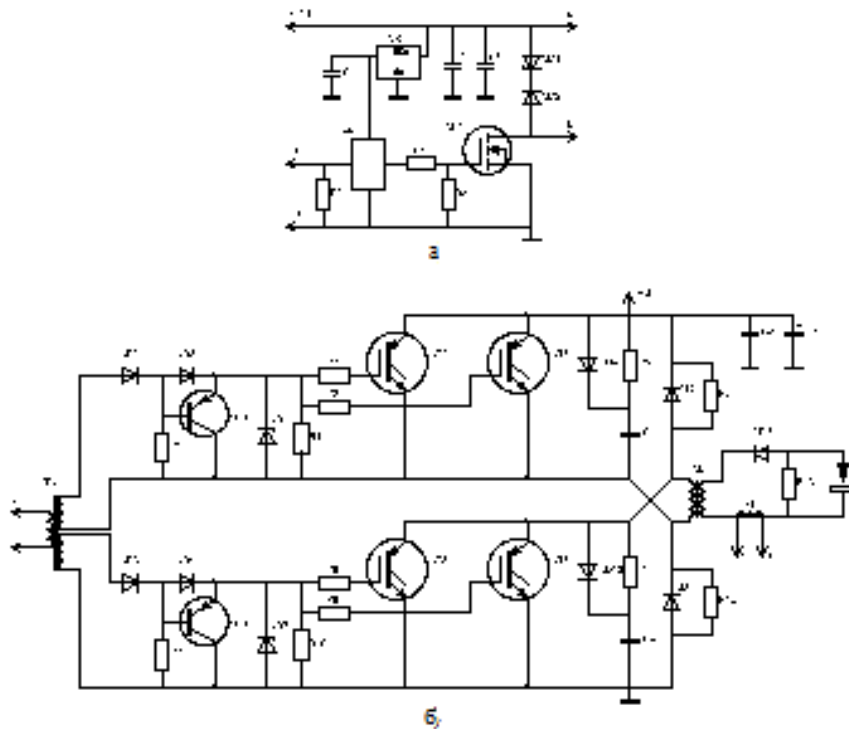


Рис. 3 – Схема электрическая принципиальная электроэрозионной установки: а – схема управления; б – двухтранзисторный однофазный преобразователь.

Схема управления (рис. 3, а) содержит в своем составе буферный элемент DD1, который формирует импульс открывающий VT1. Нагрузкой схемы управления является маломощный импульсный трансформатор TV1.

Основой электронного блока электроэрозионной установки является двухтранзисторный однофазный прямоходовый преобразователь (рис. 3, б) [12, 13]. В преобразователе применены IGBT транзисторы.

В цикле прямого хода, когда транзисторы VT2, VT3, VT5, VT6 преобразователя открыты, энергия источника питания $+U$ запасается в индуктивности намагничивания и индуктивности рассеяния трансформатора TV2 и передается в межэлектродный промежуток.

В цикле обратного хода, когда транзисторы VT2, VT3, VT5, VT6 закрыты, открываются диоды VD5, VD11 и через них протекает ток размагничивания сердечника трансформатора. Цепочки R5C1VD4 и R11C4VD10, включенные параллельно транзисторам VT2, VT3, VT5, VT6, уменьшают мощность, рассеиваемую на этих транзисторах в момент их запираания.

Управление транзисторами VT2, VT3 и VT5, VT6 происходит идентично. При открытии полевого транзистора схемы управления VT1 к первичной обмотке трансформатора TV1 прикладывается напряжение, которое

трансформируется во вторичные обмотки в полярности, отпирающей IGBT. В этом случае отпирающее положительное напряжение через открытые диоды VD2, VD3 (VD8, VD9) и резисторы R2, R3 (R8, R9) поступает на затворы транзисторов VT2, VT3 (VT5, VT6). Резисторы R2, R3 (R8, R9) подавляют паразитные колебательные процессы в цепях затворов транзисторов преобразователя. Нагрузочный резистор R1 (R7) демпфирует вторичную обмотку трансформатора TV1, подавляя колебательный процесс в контуре, образованном его внутренними паразитными емкостями и индуктивностями. Стабилитрон VD1 (VD7) ограничивает напряжение на затворах транзисторов VT2, VT3 (VT5, VT6).

При положительном напряжении управления транзистор VT1 (VT4) драйвера закрыт, а его переход база-эмиттер шунтирован открытым диодом VD3 (VD9). После закрытия транзистора VT1 схемы управления полярность напряжения на вторичных обмотках TV1 меняется на противоположную. При этом диоды VD2, VD3 (VD8, VD9) запираются, а к транзистору VT1 (VT4) прикладывается в отпирающей полярности напряжение заряженных входных емкостей транзисторов VT2, VT3 (VT5, VT6) преобразователя. Транзистор VT1 (VT4) открывается, входные емкости транзисторов VT2, VT3 (VT5, VT6) преобразователей ускоренно разряжаются, и они запираются.

Особенность трансформатора TV2 преобразователя в том, что для обеспечения импульсного режима работы его обмотки выполнены многожильным проводом (жилы изолированы друг от друга). Таким же проводом осуществляется подключение детали и электрода-инструмента.

Трансформатор ТА1 служит для контроля тока в межэлектродном промежутке. Мощный импульсный диод VD6 обеспечивает соответствующую полярность подключения детали и электрода-инструмента. Для исключения больших токов, возникающих при залипании электродов, последовательно с межэлектродным промежутком могут включаться токоограничивающие резисторы.

Выводы. С помощью разработанной электроэрозионной установки удалось изготовить модели дефектов (рис. 1) в виде прямоугольных пазов глубиной до 4 мм раскрытием не более 0,3 мм (при толщине электрода-инструмента – 0,15 мм). Наиболее приемлемый режим обработки при котором процесс электроэрозии протекает устойчиво: длительность импульсов – 1,5-3 мкс, частота следования – 20-40 кГц, амплитуда – 200 В. Износ электрода-инструмента (медь) составил 310% при обработке детали из стали У9 и 440%

для стали Ст3. Большой износ обусловлен малой толщиной электрода-инструмента.

Список литературы: 1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 2: В 2 кн. Кн 2: Ю.К. Федосенко, В.Г. Герасимов, А.Д. Покровский, Ю.Я. Останин Вихрегоковый контроль. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 688 с. 2. Корягин С.И., Пименов И.В., Худяков В.К. Способы обработки материалов: Учебное пособие / Калинингр. ун-т – Калининград, 2000. – 448 с. 3. Материаловедение и технология металлов: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.С. Гаврилюк и др.; Под ред. Г.П. Фетисова. – М.: Высшая школа, 2001. – 638 с. 4. Курець В.И., Усов А.Ф., Цукерман В.А. Электроимпульсная дезинтеграция материалов. – Апатиты: КНЦ, 2002. – 324 с. 5. Семкин Б.В., Усов А.Ф., Курець В.И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. – Апатиты: КНЦ, 1995. – 276 с. 6. Усов А.Ф., Семкин Б.В., Зиновьев Н.Т. Переходные процессы в установках электроимпульсной технологии. Л.: Наука, 1987. – 189 с.; Барнаул: изд. АГТУ, 2000 (изд. 2-ое переработанное и дополненное). – 160 с. 7. Немилев Е.Ф. Справочник по электроэрозионной обработке материалов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 164 с. 8. Фатеев Н.К. Технология электроэрозионной обработки. – М.: Машиностроение, 1980. – 184 с. 9. Е.М. Левинсон, В.С. Лев. Справочное пособие по электротехнологии. Электроэрозионная обработка металлов. – Л.: ЛЕНИЗДАТ, 1972. – 328 с. 10. А.Л. Лившиц, А.Т. Кравец, И.С. Рогачев, А.Б. Сосненко. Электроимпульсная обработка металлов. – М.: Машиностроение, 1967. – 296 с. 11. Отто М.Ш., Коренблюм М.В. Транзисторные генераторы для питания электроэрозионных станков. – М., НИИМАШ, 1968. – 68 с. 12. Володин В.Я. Современные сварочные аппараты своими руками. – СПб.: Наука и техника, 2008. – 304 с. 13. Б.Ю. Семенов. Силовая электроника: от простого к сложному. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 416 с.

Поступила в редакцию 15.05.2014

УДК 621.919:621.7.044

Е. А. ФРОЛОВ, докт. техн. наук, проф., ПолтНТУ, Полтава;
С. И. КРАВЧЕНКО, канд. техн. наук, доц., ПолтНТУ;
О. Г. НОСЕНКО, аспирант, ПолтНТУ;
С. Г. ЯСЬКО, аспирант, ПолтНТУ

ПОВЫШЕНИЕ СТЕПЕНИ ВЫТЯЖКИ ТОНКОЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ПНЕВМОУДАРНОЙ ШТАМПОВКЕ ЖИДКОСТЬЮ

Рассмотрены, а также аналитически и экспериментально исследованы пути повышения степени вытяжки тонколистовых деталей методом пневмоударной штамповки жидкостью. Получены зависимости, позволяющие проектировать технологический процесс высокоскоростной штамповки тонкостенных деталей за счет искусственного регулирования величин протяжных ребер формообразующих матриц на пневмоударном оборудовании модели Т1324 штамповки жидкостью.

Ключевые слова: высокоскоростная вытяжка, степень вытяжки, пневмоударная штамповка жидкостью, тонколистовые детали, технологический процесс.

Постановка проблемы. Характерной особенностью технологических операций тонколистового формообразования является ограничение возможностей процессов предельными деформациями. Особенно это касается операции высокоскоростной вытяжки [1]. Ограничения в данном случае с одной стороны связаны с исчерпанием пластичности металла и нарушением

условий устойчивости пластического деформирования, а с другой стороны – за счет высокой скорости формообразования, приводящей к локальным чрезмерным утонениям стенки детали или в некоторых случаях к полному разрушению заготовки [2].

Целью работы является определение зависимостей, позволяющих интенсифицировать технологический процесс динамической штамповки тонкостенных деталей вытяжкой подвижными средами.

Изложение основного материала исследований. Для тонколистовой штамповки деталей с гибкостью $\lambda = d/s > 200$ (d, s – диаметр и толщина стенки изделия) характерны утонения стенок, достигающие 30...40 % исходной толщины материала, и наличие гофров на поверхности отштампованных деталей [2, 3].

Для оценки возможности увеличения степени вытяжки фланца и уменьшения утонения проанализируем условия вытяжки заготовки.

Как известно [2], перемещение материала при высокоскоростной штамповке можно разбить на два этапа: перемещение в период разгона и в период торможения.

Эксперименты показывают, что окончание периода разгона фланца при тонколистовой штамповке совпадает с оформлением заготовки в пространственный полуфабрикат, глубина проштамповки которого линейно зависит от величины радиуса закругления протяжного ребра матрицы ρ . Если величина радиуса закругления меньше оптимальной, то дальнейшая доштамповка полуфабриката осуществляется за счет преобладающего растяжения материала донной части заготовки.

Для оценки кинематических условий вытяжки фланца можно воспользоваться уравнением

$$\frac{Mv^2}{2} = k\pi \cdot d_0 \sigma_{\delta} s l e + \frac{M_{\delta} v_{\delta}^2}{2}, \quad (1)$$

где M, M_{ϕ} – соответственно масса донной части и фланца;

v, v_{ϕ} – скорости перемещения донной части и фланца;

σ_{τ} – предел текучести штампуемого материала;

k – коэффициент динамичности;

d_0, s, l – соответственно диаметр и толщина стенки детали, длина участка зоны одноосного растяжения;

e – деформация участка зоны.

Кинематическое условие (1) позволяет при известных значениях членов в первой части уравнения определить критические скорости перемещения донной части заготовки v в любой момент времени. Знание допустимой скорости перемещения донной части позволяет целенаправленно управлять технологическим режимом штамповки: внешней нагрузкой, геометрией матрицы, допустимой глубиной проштамповки $f_{п.}$

Так как наиболее значима оценка конечного этапа формообразования, то проведем анализ условия вытяжки (1) в период торможения фланца, когда скорость перемещения фланца $v \rightarrow 0$. Коэффициент динамичности $k \approx 1,2-1,4$, средняя деформация зоны одноосного растяжения, примыкающей к протяжному ребру матрицы, $e \leq 0,1$.

Несколько сложнее оценка величины зоны одноосного растяжения. Ее значение можно установить либо экспериментальным путем с помощью скоростной видеосъемки, либо воспользоваться результатом проделанных ниже вычислений.

При определении размеров зоны одноосного растяжения – сжатия примем, что положение каждой точки деформирующейся донной части заготовки может быть описано системой уравнений постоянства объема при пластическом течении и дифференциальных соотношений между скоростями деформаций, записанных в соответствии с известной методикой [3] в сферической системе координат. Так как процесс деформирования осесимметричен, то перекосы и скручивание в тангенциальном направлении отсутствуют. Поэтому тангенциальная составляющая скорости равна $v_{\phi} = 0$, сдвиговые скорости деформаций $\varepsilon_{r\theta} = \varepsilon_{\theta\phi} = \varepsilon_{\phi r} = 0$. Также учтем, что перемещения и скорости в направлении радиуса деформирующейся оболочки весьма мало влияют на положение зоны двухосного растяжения, следовательно, можно принять радиальную скорость $v_r = 0$. Тогда полная система уравнений упростится:

$$\frac{\partial v_{\theta}}{r \partial \theta} + \frac{v_{\theta}}{r} \operatorname{ctg} \theta = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial v_{\theta}}{\partial r} - \frac{v_{\theta}}{r} = 0, \quad (3)$$

где v_{θ} – меридиальная составляющая вектора скорости;

r, θ – координаты в сферической системе: радиус и угол, определяющие положение точки в меридиальном сечении.

Система уравнений (2) и (3) имеет смысл только для зоны двухосного растяжения и допускает два решения:

$$v_{\theta} = -r \operatorname{ctg} \theta + C_1 \quad (4)$$

и

$$v_{\theta} = r\theta + C_2 \quad (5)$$

при значениях $\theta \leq 22^\circ$. Тогда размер зоны одноосного растяжения – сжатия можно найти:

$$l = r_0 - r_i = r_0 - \frac{r_0^2 + f_i^2}{2f_i} \sin 22^\circ. \quad (6)$$

Учтем, что на этапе торможения скорость перемещения фланца может быть принята $v_{\text{ср}} = 0$, а длина $l \approx 10-15$.

Тогда после нескольких преобразований уравнения (1) установим, что скорость донной части заготовки (относительно фланца) не должна превосходить

$$v \leq 3 \sqrt{\frac{\sigma_{\delta}}{\lambda \gamma}}, \quad (7)$$

где γ – плотность штампуемого материала.

Выражение (7) показывает, что увеличение габаритов изделия (увеличение гибкости λ) приводит к необходимости предусматривать мероприятия уменьшения скорости, которая при $\lambda > 400$ имеет значения $v \leq 25$ м/с.

Анализ условий (1) и (7) позволяет прийти к выводу, что вытяжка фланца происходит в наиболее оптимальных условиях, когда скорость фланца $v_{\text{ф}}$ не равна нулю и стремится к значениям v . Поэтому при импульсной штамповке увеличение степени вытяжки связано с управлением периодом разгона штампуемой заготовки. Одним из решений этой задачи можно считать искусственное увеличение радиуса закругления протяжного ребра матрицы.

На основании проведенных экспериментов по штамповке деталей с гибкостью $150 < \lambda < 1000$ была выведена полуэмпирическая зависимость относительного радиуса закругления протяжного ребра матрицы $\bar{\rho} = \frac{\rho}{s}$:

$$\bar{\rho} = [0,375k_0 - 0,5]\lambda, \quad (8)$$

устанавливающая связь с коэффициентом вытяжки $k_0 = \frac{D_0}{d}$ (D_0 – диаметр заготовки) и гибкостью λ . График зависимости (8) приведен на рис. 1. Точками показаны значения $\bar{\rho}$, совпадающие со значениями, рекомендуемыми практикой листовой штамповки [4].

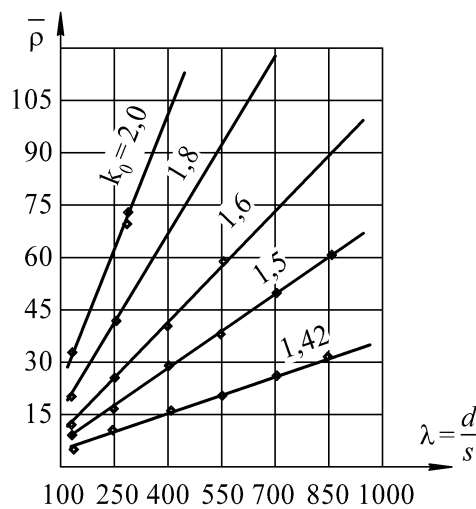


Рис. 1 – Рекомендуемые значения оптимальных радиусов закругления протяжных ребер

График $\bar{\rho} = f(k_0; \lambda)$ может служить номограммой для определения оптимальных радиусов закругления протяжных ребер при известных значениях начального коэффициента вытяжки k_0 и гибкости λ . Эксперименты показали, что гофры на поверхности, возникающие при штамповке с увеличенными по сравнению с обычно принятыми [4] радиусами закругления, не превышают предельно допустимые значения при их устранении в условиях двухосного растяжения

$$\bar{h} = \frac{h}{b} = 0,1 + \left(\frac{k_0}{k_\phi} \right)^2 (k_0 - 1) \leq 1,2, \quad (9)$$

где h, b – максимальная высота и ширина гофра на поверхности детали;

k_ϕ – коэффициент вытяжки фланца;

$k_{\phi} = D_0/D_{\phi}$ (D_0, D_{ϕ} – диаметры заготовки до и после вытяжки).

На рис. 2 показаны детали типа полусфер, отштампованные из листовых заготовок АМцМ и Х18Н9Т толщиной 0,5 мм и диаметром 100 и 300 мм ($\lambda_1 = 200, \lambda_2 = 600$). Утонение отштампованных деталей не превышало 20 %. Глубина штамповки полуфабриката, как показали эксперименты, может находиться по формуле

$$f_i = \frac{f}{k_r} + \Delta\rho, \quad (10)$$

где f – глубина детали;

k_r – технологический коэффициент $k_r \leq 1,25$;

Δ – экспериментальный коэффициент $\Delta = 1,04 \dots 1,1$.

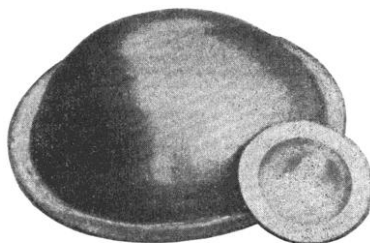


Рис. 2 – Модельные детали

Выводы. Таким образом, найденные зависимости (8), (9), (10) позволяют проектировать техпроцесс высокоскоростной штамповки тонкостенных деталей из различных материалов, при этом существенно увеличивая степень вытяжки за счет искусственного регулирования величин радиусов закругления протяжных ребер матриц и скорости деформирования при пневмоударной штамповке жидкостью.

Список литературы: 1. Фролов Е. А. Пневмоударная и статикодинамическая штамповка сложнорельефных листовых деталей упругими средами [Текст]: моногр. / Е. А. Фролов, А. Я. Мовшович, И. В. Манаенков и др. – Х.: УкрГАЗТ, – Краматорск: ДГМА, изд. центр НТУ «ХПИ», 2010. – 286 с. 2. Мельников Э. Л. Холодная штамповка днищ [Текст] / Э. Л. Мельников. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с. 3. Алексеев Ю. Н. Вопросы пластического течения металлов [Текст] / Ю. Н. Алексеев. – Х., 1958. – 188 с. 4. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке [Текст] / В. П. Романовский. – М.–Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.: ил.

Поступила в редколлегию 25.05.2014

УДК 621.979

Ю. П. БОРОДИЙ, канд.техн.наук, доц., НТУУ «Київський політехнічний інститут»

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЙ ТА УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ НАНЕСЕННЯ КОМБІНОВАНИХ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ НА ДЕТАЛІ ТИПУ ВАЛУ

Стаття присвячена розробці технологій поверхневого зміцнення деталей машин типу валів шляхом створення комбінованих багатошарових зносостійких покриттів з заданими властивостями. Отримані результати представляють практичний інтерес для технологічних розробок, що забезпечують формування покриттів з необхідними експлуатаційними властивостями для різних умов роботи деталей машин, а також інформацію про можливість зміни властивостей покриттів. Нанесення електроіскрових покриттів збільшує експлуатаційну стійкість деталей машин в 3-6 разів.

Ключові слова: поверхнєве зміцнення, деталі машин, електроіскрове легування, поверхнєве пластичне деформування, зносостійкі покриття.

Вступ. Підвищення ефективності використання сучасної техніки в різних галузях промисловості можна досягнути продовженням її експлуатаційного ресурсу шляхом поверхневого зміцнення робочих поверхонь, а також її швидкий і якісний ремонт та відновлення деталей. Значний інтерес для практики становить метод електроіскрового легування (ЕІЛ), який відноситься до групи електрофізичних методів поверхневого зміцнення деталей машин. Основні переваги методу полягають в можливості переносу на поверхню, що обробляється, матеріалів високої твердості (твердих сплавів), в високій міцності зчеплення зміцненого прошарку з основою, нанесенні покриття без помітної деформації деталей. Значного ефекту можна досягти, використовуючи технології комбінованого зміцнення деталей машин з поєднанням ЕІЛ та поверхневого пластичного деформування (ППД). За допомогою комбінованого зміцнення з'являється можливість створення багатошарових зносостійких покриттів на робочих поверхнях деталей машин. При цьому вдається в значній мірі подолати недоліки кожного методу зміцнення, а також керувати властивостями покриття.

Метою статті є розробка технологій поверхневого зміцнення деталей машин типу валів шляхом створення комбінованих багатошарових зносостійких покриттів з заданими властивостями.

Основний матеріал та результати. В процесі виконання роботи були досліджені методи нанесення монопокриттів:

1. Електроіскрове легування (ЕІЛ).

2. Поверхнєве пластичне деформування (ППД) – обкатування роликом або кулею.

Окрім того, досліджувались комбіновані методи поверхневого зміцнення:

1. Електрофізичні методи та поверхнєве пластичне деформування:

- ППД+ЕІЛ твердосплавним електродом + ППД; ППД+ЕІЛ+ППД+ЕІЛ міддю.

- Багатократне нанесення покриття ЕІЛ+ППД+ЕІЛ+ППД (до 4 проходів) [1].

2. Поєднання різних видів електроіскрового легування:

- ЕІЛ графітовим електродом, наступне ЕІЛ твердосплавним електродом, ЕІЛ графітовим електродом та ЕІЛ мідним електродом;

- Нанесення покриття в декілька прошарків шляхом проведення ЕІЛ різними режимами;

- Періодична обробка ЕІЛ в процесі зношування ріжучих кромek при роботі штампу.

Для лабораторної оцінки ефективності зміцнення використовували дослідження на машині тертя М-22М за схемою «вал-вкладиш» із охолодженням зразка водою (рис. 1).

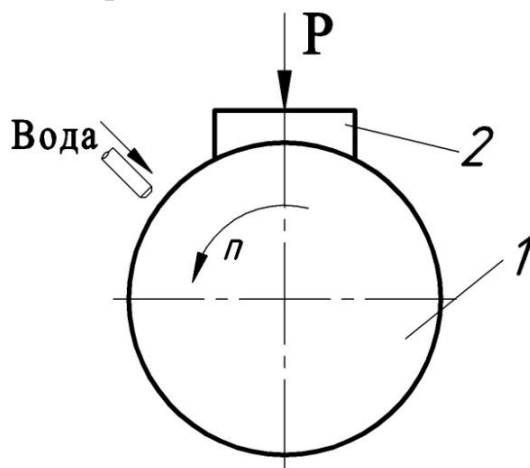


Рис. 1 – Схема випробувань на машині тертя М-22М: 1 – кільцевий зразок-вал; 2 – зразок-вкладиш. Р – сила притискання зразків, n – частота обертів зразка-валу

Дослідження показали збільшення зносостійкості відпаленої сталі У7 (HV 220-240) з комбінованим покриттям після пробігу 25 км – в 4 рази, при пробігу 50 км – в 2,5 рази (рис. 2), а загартованої сталі 45 (HV 337 та HV 420) з комбінованим покриттям після пробігу 22 км в 5 разів (рис. 3). Це свідчить, що

на стадії припрацювання зносостійкість покриття значно вища, ніж на усталеній стадії.

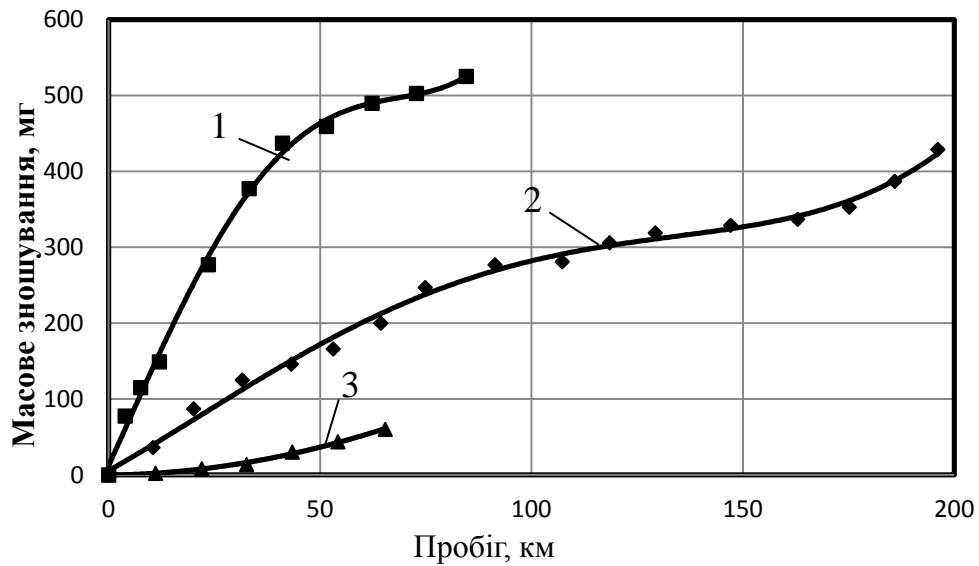


Рис. 2 – Залежність масового зношування зразків зі сталі У7 (HV 220...240) після комбінованої обробки (обкочування кулькою з зусиллям 1,6 кН, ЕІЛ та знову обкочування кулькою) від пробігу: 1 – зразок без обробки (P=400 Н); 2 – зразок після обробки (P=400 Н); 3 – зразок після обробки (P=300 Н).

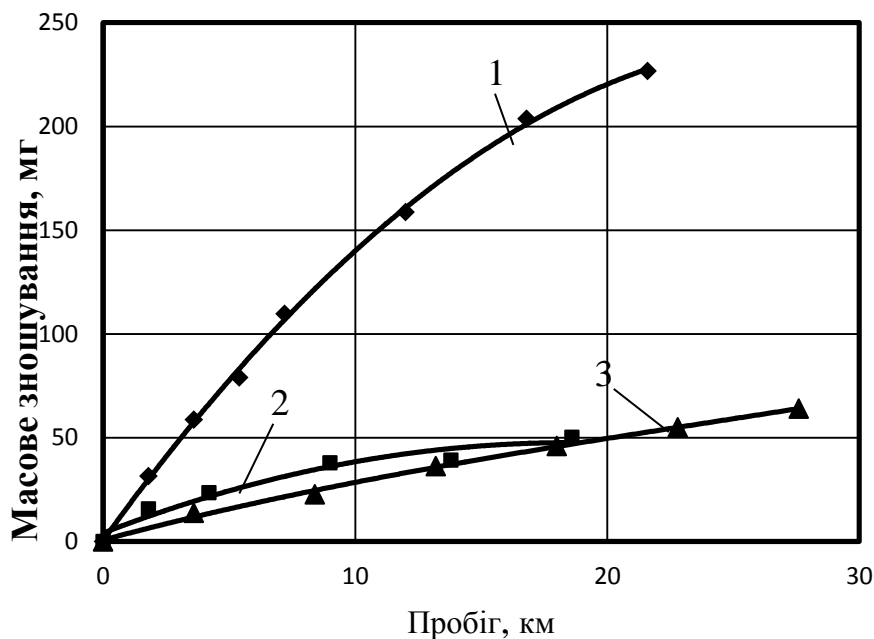


Рис. 3 – Залежність масового зношування зразків із сталі 45 після комбінованої обробки: 1 – зразок (HV 337) без обробки після випробувань при P=500 Н; 2 – зразок (HV 337) після обробки та випробувань при P=500 Н; 3 – зразок (HV 420) після обробки (P=500 Н)

Вплив комбінованого зміцнення, яке включає ЕІЛ та обкатування, на зносостійкість кільцевих зразків із сталі 45 приведені у вигляді графічних залежностей (рис. 4), що дозволяє порівняти їх ефективність.

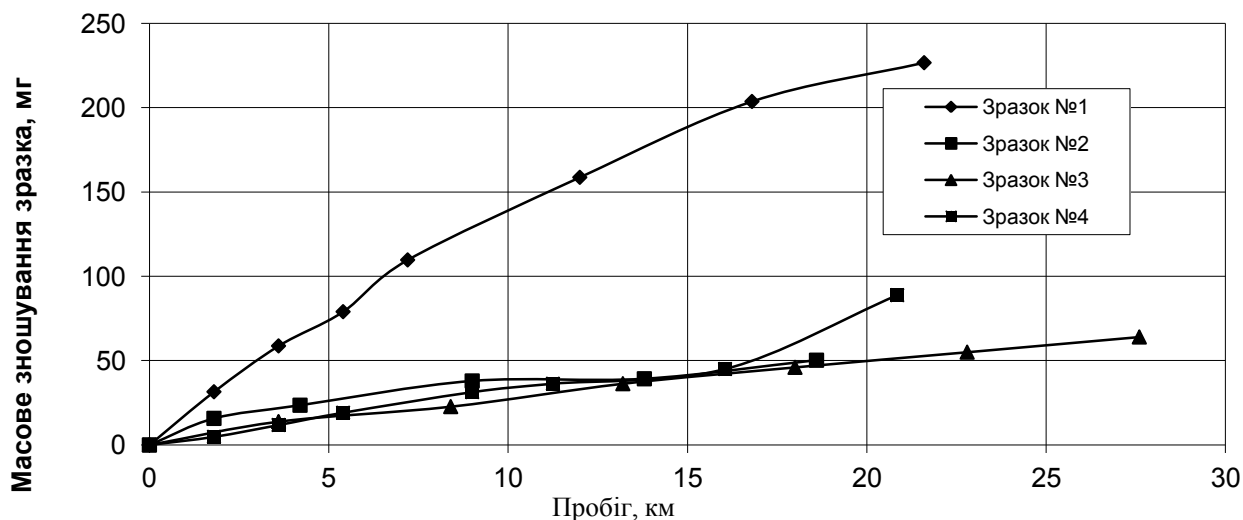


Рис. 4 – Дослідження впливу комбінованого зміцнення (ЕІЛ та обкатування) на зносостійкість кільцевих зразків із сталі 45: Зразок №1 – HV 420; обкатування роликом (1,6 кН, 4 переходи) Зразок №2 – HV417; обкатування роликом (2,4 кН, 4 переходи) + обробка ЕІЛ механізоване (струм 5-6 А, 63 об/хв) + обкатування кулею (1,6 кН, 4 переходи) Зразок №3 – HV 420; обкатування роликом (1,6 кН, 4 переходи) + обробка ЕІЛ механізоване (струм 7-8 А, 63 об/хв) + обкатування кулею (1,6 кН, 4 переходи) Зразок №4 – HV 400; обкатування роликом (2,4 кН, 4 переходи) + обробка ЕІЛ механізоване + обкатування роликом (1,6 кН, 4 переходи)

На основі проведених досліджень був зроблений висновок, що зміцнення поверхні комбінованим покриттям за схемою ППД→ЕІЛ→ППД→ЕІЛ→ППД [1] дозволяє створити багатшарову структуру, підвищити твердість робочих поверхонь в 2 – 2,5 рази та зносостійкість поверхонь в 1,5-5 разів. При нанесенні комбінованого зносостійкого покриття за схемою ППД→ЕІЛ→ППД→ЕІЛ→ППД [1] виникають загартовані ділянки із багатшарової структури із загартованих та декілька разів перегагартованих об'ємів, в яких підвищений склад карбідів вольфраму та лінз.

В результаті була розроблена технологія підвищення зносостійкості деталей машин типу валів, гребенів колісних пар локомотивів, валів цементних фасувальних машин, яка включає попереднє поверхневе пластичне деформування кулькою за допомогою пристрою, який встановлюється в різцетримач токарно-гвинторізного верстату, механізоване ЕІЛ твердим сплавом за допомогою спеціальної головки, теж розташованої в різцетримачі. Режим обробки обкочуванням повинен бути оптимальним. В першу чергу це відноситься до зусилля обкочування (тиску кульки на деталь), подачі та кількості проходів. Визначення режимів обкочування ускладнюється тим, що залежність між ним та ступенем зміцнення та шорсткістю нелінійна. Деяка оптимізація по зусиллю для кульки 10 мм проведена в роботі [2]. Встановлено,

що оптимальним для пластичних сталей є навантаження 200...350 кг. Збільшення тиску на поверхню приводить до порушення цілісності металу на поверхні та виникненню лущення поверхні. Твердість деталей при обкочуванні не повинна перевищувати 50 HRC.

По запропонованій технології формується зміцнений поверхневий шар, твердість якого на поверхні досягає 1200 HV. Його припрацювання супроводжується полірувальним ефектом.

Роль твердих часток, які знаходяться на робочій поверхні деталі або на поверхні ріжучої кромки штампу, не вичерпується їх високою зносостійкістю. Можна припустити, що вони блокують пластичну течію металу із зони контакту, де створюється високий тиск. Важливе значення має міцність з'єднання твердих часток з основним матеріалом. Матеріал деталі та тверді частки повинні працювати як єдине ціле, що можливо забезпечити комбінованими методами нанесення зносостійких покриттів. При ЕІЛ поверхні деталі твердим сплавом утворені структурні елементи, їх кількість та характер розташування залежить також від початкового структурного стану поверхневого шару, точніше від енергетичного стану атомів на поверхні. Він може бути змінений методами поверхневого пластичного деформування. Густина дислокацій, наприклад в сталі 45 після обкочування кулькою, збільшується на порядки. Якщо розглянути простір біля дислокації як простір з атомами підвищеної активності, то число зон підвищеної активності на поверхні збільшується в тисячі разів, що значно збільшує дифузійні процеси. По мірі збільшення пластичної деформації в металі відбувається створення блоків та їх розворот [3]. При дії електричного розряду в металі протікають процеси, які пов'язані з високошвидкісним нагрівом локальних зон до температур фазових перетворень, а можливо і до температур плавлення, з наступною кристалізацією та загартуванням. Відбувається дифузія елементів електроду в поверхневий шар деталі. В поверхневих шарах виникають структури у вигляді лінз, які залишаються білими після травлення [4].

Для механізованої обробки деталей типу тіл обертання розроблена технологія нанесення комбінованих зносостійких покриттів. В загальному вигляді така технологія включає наступні етапи [1]:

- підготовка деталей, що включає механічну обробку до кінцевих розмірів або до розмірів з припуском під шліфування;
- підготовка установки ЕІЛ-2 до роботи, що включає підбір оптимальних струмів, електродів та їх матеріалів;

- підготовка установки для ППД, що включає підбір оптимального зусилля;
- нанесення покриття проводиться пошарово:

ППД→ЕІЛ→ППД→ЕІЛ→ППД

- робочий режим легування з контролем параметрів процесу та контролем сили притискання електроду;
- контрольні обміри деталі для визначення товщини отриманого покриття;
- остаточне шліфування деталі до отримання розмірів, потрібних по кресленням.

Розроблена технологія здійснюється за допомогою спеціально розробленого устаткування (рис. 5-8).

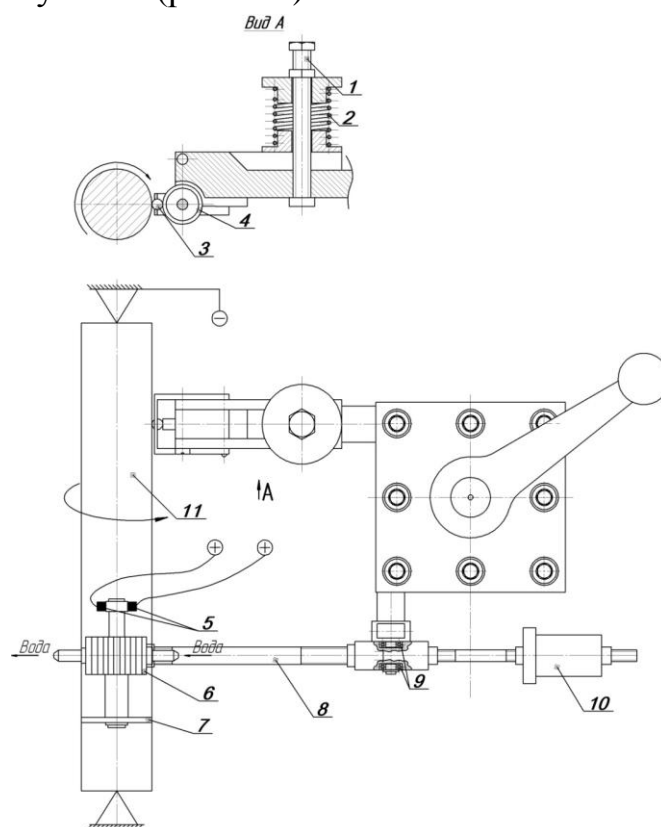


Рис. 5 – Схема установки для формування комбінованого зносостійкого покриття на валах:
1 – регулювальний гвинт; 2 – пружина; 3 – кулька; 4 – підшипник; 5 – графітові щітки; 6 – радіатор; 7 – електрод; 8 – штанга; 9 – підшипники; 10 – протизага; 11 – деталь, що оброблюється (вал)

На рис. 5 представлена схема комплексу пристроїв для формування комбінованого зносостійкого покриття на деталях типу вал, тобто на тілах, що мають поверхню обертання. Основні складові частини цього комплексу

(пристрій для обкочування кулькою та пристрій для механізованого нанесення ЕІЛ з обертанням електроду) встановлюються в різцетримач токарного верстату.

На рис. 6 зображена тривимірна модель-схема комплексу пристроїв для формування комбінованого зносостійкого покриття на деталях типу вал.

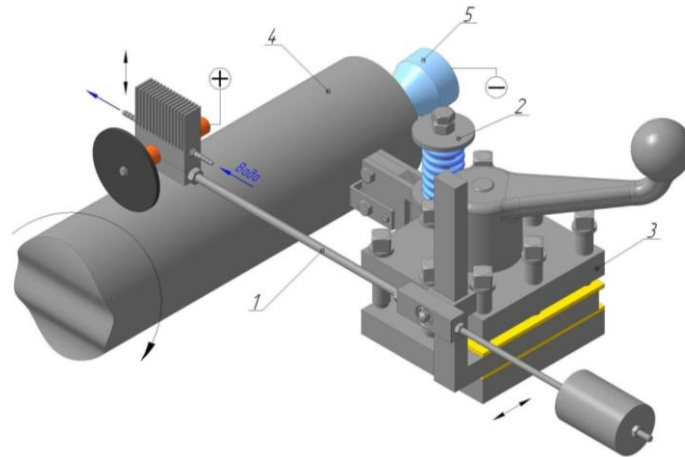


Рис. 6 – Тривимірна модель-схема установки для формування комбінованого зносостійкого покриття на деталях типу вал: 1 – пристрій для ЕІЛ; 2 – пристрій для обкочування; 3 – супорт токарно-гвинторізного верстату; 4 – оброблювана деталь; 5 – центр з електричним контактом

На рис. 7 та рис. 8 представлені тривимірні модель-схеми складових частин цього комплексу, а саме, пристрою для обкочування кулькою $\varnothing 10$ мм, а також пристрою для механізованого нанесення ЕІЛ з обертанням електроду.

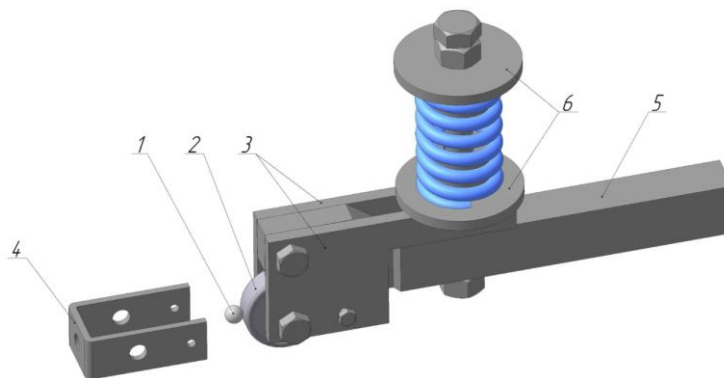


Рис. 7 – Тривимірна модель-схема пристрою для обкочування кулькою $\varnothing 10$ мм: 1 – кулька; 2 – підшипник; 3 – важелі; 4 – тримач; 5 – корпус; 6 – шайби

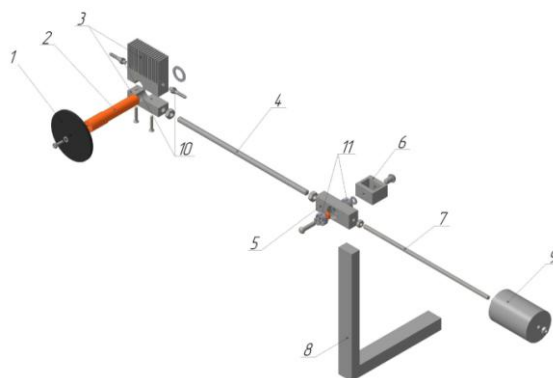


Рис. 8 – Пристрій для механізованого нанесення ЕІЛ з обертанням електроду: 1 – електрод; 2 – вісь; 3 – радіатор; 4 та 7 – штанги; 5 – корпус; 6 та 8 – деталі кріплення; 9 – противага; 10 – штуцери; 11 – підшипники

При багаторазовому повторному легуванні по технології: попереднє ППД обкочуванням кулькою – ЕІЛ твердим сплавом – ППД обкочуванням кулькою – ЕІЛ твердим сплавом – ППД обкочуванням кулькою виникають загартовані ділянки із багатшарової структури із загартованих та декілька разів перегагартованих об'ємів, в яких підвищений склад карбідів вольфраму та лінз. При пластичному деформуванні поверхневого шару відбувається деформування, подрібнення та утворення вторинних структур, які складаються з перенесених карбідів та основного матеріалу. Обкочування кулькою після ЕІЛ дає можливість проведення повторного ЕІЛ, збільшує товщину зміцненого шару та його щільність. У випадку високовуглецевих сталей багаторазове ЕІЛ та обкочування кулькою проводять до термообробки.

Для підвищення стійкості деталей машин типу валу в умовах виробництва розроблена технологія створення комбінованих покриттів за наступною схемою (з використанням ЕІЛ різними електродами, з вібрацією електроду):

- підготовка деталей, що включає механічну обробку до кінцевих розмірів або до розмірів з припуском під шліфування;
- підготовка установки ЕІЛ-2 до роботи, що включає підбір оптимальних струмів, розмірів і наступних матеріалів електродів: твердий сплав ВК15 і графітовий стержень з ЕД-75;
- нанесення твердого покриття проводиться пошарово: ВК15→графіт→ВК15;
- робочий режим легування з контролем параметрів процесу: по струму споживання (0 – 20А) і напрузі (до 250В), а також візуально по іскрі;
- електроіскрове шліфування зразка при тих же параметрах процесу із зміною полярності електроду і деталі;

- контрольні обміри деталі для визначення товщини отриманого покриття;
- обкатка роликком циліндричної або обтискання плоскої поверхні деталі до необхідних розмірів і чистоти поверхні не нижче 7 класу;
- остаточне шліфування деталі до отримання розмірів, потрібних за кресленням.

Висновки:

1. Отримані результати представляють практичний інтерес для технологічних розробок, що забезпечують формування покриттів з необхідними експлуатаційними властивостями для різних умов роботи деталей машин, а також інформацію про можливість зміни властивостей покриттів методом варіювання електродними матеріалами.

2. Нанесення електроіскрових покриттів збільшує експлуатаційну стійкість деталей машин в 3–6 разів.

Список літератури: 1. Патент на корисну модель №40858 Україна, МПК В23Н 1/00. Спосіб електроіскрового зміцнення поверхні металів та сплавів / Маковей В.О., Бородій Ю.П., Куріхін В.С. (Україна) НТУУ. – № u2008 13977 Заявл. 04.12.2008; Опубл. 27.04.2009, Бюл. №8. 2. Самсонов Г.В. Електроіскрове легування металічних поверхонь/ Самсонов Г.В. та ін.// Київ: Наукова думка. – 1976, – с. 220. 3. Шнейдер Ю.Г. Чистовая обработка металлов давлением/ Шнейдер Ю.Г. // М. – Л: ГНТИ машиностроительной литературы, 1963. – 263 с., ил. 4. Бородий Ю.П. Экспериментальное исследование особенностей формирования поверхностного износостойкого слоя рабочих элементов разделительных штампов/ Бородий Ю.П., Маковей В.А.// Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Вип. 2 (37). – 2013. – ПолтНТУ.

Надійшла до редколегії 24.05.2014

УДК 534.2+539.14.01

В. В. ЛОТОУС, председатель правления ОАО «Полтавский ГОК»,
Комсомольск;

Е. А. НАУМОВА, инженер, Кременчугский национальный университет
им. М. Остроградского, Кременчуг;

В. В. ДРАГОБЕЦКИЙ, докт. техн. наук, проф., Кременчугский
национальный университет им. М. Остроградского, Кременчуг.

ИМПУЛЬСНОЕ ОБЖАТИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

В статье приведено описание технологий основанных на действии кумулятивных зарядов взрывчатого вещества на обрабатываемый материал. Рассмотрены вопросы использования энергии взрыва для распада и синтеза химических элементов в кумулятивной струе. Приведено качественное описание процесса обжатию цилиндрической оболочки кумулятивным зарядом взрывчатого вещества. Образующиеся при обжатии оболочки гофры становятся источниками системы кумулятивных струй.

© В. В. Лотоус, Е. А. Наумова, В. В. Драгобецкий, 2014

Исследования позволили разработать новые технологии взрывного упрочнения и легирования и метод физического моделирования обжатия вязких материалов.

Ключевые слова: взрывные технологии, кумуляция, плазма, химические элементы, взрывчатые вещества, гофрообразование.

Введение. Импульсное обжатие цилиндрических оболочек в ряде случаев приводит к возникновению кумулятивных струй. Явление кумуляции находит применение в военном деле и при решении комплекса технических задач в горном деле, в процессах электрогидравлической и взрывной штамповки при взрывном плакировании и резке материалов. Новым направлением, связанным с использованием ударно-волновых процессов в условиях кумуляции ударных волн, нацелены на решении проблемы управляемого термоядерного синтеза для синтезирования химических элементов, поиском новых источников энергии и взрывного легирования материалов [1-3]. Появлению этих технологий предшествовали исследования по динамическому легированию материалов в режиме сверхглубокого проникновения микрочастиц [1].

Анализ последних исследований и литературы. В процессах высокоэнергетического механического воздействия в металлах, подвергнутых действию кумулятивных зарядов взрывчатого вещества, чрезвычайно активно интенсифицируются химические реакции, возрастает скорость фазовых превращений, упругопластической деформации, наблюдаются явления жидкофазного спекания [3], нонизации и электрической поляризации. Кроме того, наряду с диспергированием вещества происходит разложение вещества, «разрыхление» химических связей в импульсно сжатом материале, излучение света и жестких фотонов (при γ -излучении), эмиссия звука (фононов) и высокоэнергетических электронов [3]. Традиционно в этих технологиях используются заряды взрывчатого вещества с конической или сферической кумулятивной полостью. Количественная теория кумуляции в первом приближении базируется на ряде гипотез, в одной из которых принимается, что материал кумулятивной оболочки и мишени считаются идеальными жидкостями. В рамках этой теории явление кумуляции представляется следующим образом. В начальный момент все элементы конической или сферической оболочки приобретают скорость более $2 \cdot 10^3$ м·с⁻¹ в направлении оси конуса или сферы, и происходит обжатие поверхности с утолщением ее стенок. При подходе материала к оси поверхности часть материала выжимается и выплескивается вперед [4]. В результате этого из конуса или сферы выжимается струя.

Теория первого приближения нашла подтверждение в экспериментах в достаточно широких пределах варьирования зарядов взрывчатого вещества, материалов и геометрии оболочек и т.д. Однако тот факт, что с уменьшением угла конусности и диаметра струи скорость и давление возрастают до сколь угодно больших величин не нашел подтверждения. Тем не менее, проблема получения больших скоростей и давлений имеет чрезвычайно актуальное значение для реализации условий синтеза и выделения больших энергий. Решение этой проблемы позволит новые технологии образования различных наноструктур, дискретных и аморфных металлов и металлических частиц наноструктур, фуллеренов. Вызывают большой интерес экспериментальные исследования W.S.Koski по обжатию цилиндрических оболочек из бериллия специальным зарядом взрывчатого вещества. В этих условиях удалось получить поток частиц со скоростями около $9 \cdot 10^3$ м·с⁻¹ [4]. Но в этом случае образуется не конденсированная струя, верхний предел скорости которой близок к удвоенной скорости звука облицовки, а газообразная струя потока частиц с малым атомным весом. Вызывает интерес факт образования не струи, а потока частиц. Создание потока частиц позволит интенсифицировать процессы взрывного (динамического) легирования материалов, получения высоких скоростей, синтеза материалов и выделения энергии.

Основными дополнительными факторами при моделировании процесса обжатию оболочек являются учет уравнения состояния материалов, скорости детонации взрывчатого вещества и механических характеристик материалов облицовки.

Получение кумулятивной струи из потока частиц возможно по схемам соответствующей процессам сварки взрывом пластин и оболочек. Т.е. при обжатию взрывом системы концентрично расположенных труб или пластинок [4] (соответствует вертикальной схеме сварки взрывом) на торце системы получаем концентрично или параллельно вылетающие кумулятивные потоки частиц. Однако при этом, как показывают многочисленные эксперименты и промышленные эксперименты по сварке взрывом внутренние плазмы, генерируемые детонацией между соударяющимися поверхностями металлов не возникают, а их скорость не превышает $17 \cdot 10^3$ м·с⁻¹. В этом случае возможно образование ударной плазмы при ударах кумулятивных струй с мишенью из свинца, цинка, мягкой стали и меди [1]. При использовании этого метода для динамического легирования материалов нет необходимости обеспечивать выдержку условий для образования сварного соединения концентрично или

параллельно расположенных пластин и оболочек. Наиболее эффективное образование системы кумулятивных струй происходит в условиях, когда к моменту прихода к поверхности металла растягивающих напряжений, образующихся на границе выхода ударной волны, расплавленный металл в зоне соударения не успеет застыть, что не допустимо при сварке взрывом.

Целью исследования, постановкой проблемы данной работы является исследование и качественное описание процесса импульсного обжата цилиндрической оболочки с объяснением факта образования дискретной кумулятивной струи. Для объяснения явления образования потока частиц в кумулятивной струе при обжатии цилиндрической оболочки, видимо необходимо учесть и ее процесс деформирования.

Материалы исследований. Эксперименты по обжатию тонкостенных труб энергией взрывчатого вещества, расположенного вблизи их конца, показывают, что трубка будет обжата так, что ее сечение будет волнистым с наибольшим количеством волн вблизи заряда (до восьми) [4]. По длине трубки число волн уменьшается с восьми до шести, четырех и двух (рис. 1). Это в том случае если материал трубки – упруго-пластический. Аналогичное явление наблюдается и при потере устойчивости трубки из вязкого материала. Опыт состоял в следующем – трубка изготавливалась из пластилина и охлаждалась. На конец трубки одевалась эластичная резиновая трубка. При этом силы обжата резины не вызывали деформаций испытуемой трубки из пластилина. Затем трубка помещалась в нагретую до 40°-50°С воду. По мере нагрева пластилинового тонкостенной трубки происходил процесс гофрообразования до 5 гофров.

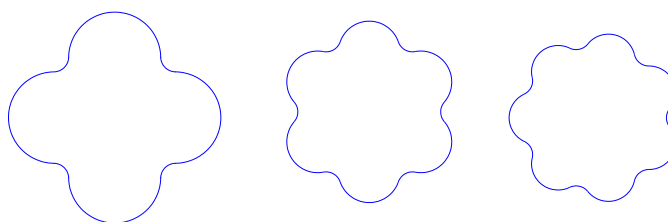


Рис. 1 – Последовательность изменений формы поперечного сечения трубы при импульсном нагружении ее торца

Учет механических характеристик необходим, так как количество вводимого продуктами детонации в кумулятивную оболочку тепла, отнесенного к единице поверхности, составляет не более 0,96 Дж/см² [4]. По сравнению с теплом, выделяемым при обжатии оболочки вследствие

пластической деформации и соударении ее поверхностей это количество тепла незначительно. При обжати оболочек происходит потеря устойчивости стенки с образованием гофров (волнистости). Гофрообразование конических, сферических и цилиндрических оболочек происходит по-разному (рис. 2) [5].



Рис. 2 – Образование гофров на конической, цилиндрической и сферической оболочках*

Вершина конуса и сферы устойчивости не теряет. Кумулятивная струя образуется и начинает движение из этой области. Образующиеся гофры вливаются в струю до соударения внешних поверхностей гофров. Т.е. в направлении оси приближаются свободные поверхности струйных потоков. При обжати цилиндрической оболочки происходит соударение не стенки оболочки, а вершин гофров и их внутренних поверхностей. Стенки гофров становятся дополнительными источниками кумулятивных струй в поперечном направлении. Встречное соударение струй приводит к образованию мелкодисперсной пелены.

Результаты исследований. Моделирование процесса импульсного обжати цилиндрической оболочки с учетом потери устойчивости проведем при некотором заданном возмущении с использованием критерии начальных несовершенств. Рассмотрим влияние возмущающих факторов. Решая задачу об устойчивости, допускаем, что импульсное давление, приложенное к цилиндру, имеет некоторый эксцентриситет, либо оболочка имеет начальное волнообразование.

Эксцентриситет приводит к неравномерному распределению давления по окружности в фиксированный момент детонации в пределах изменения $R_0 - e$ до $R_0 + e$, где R_0 – начальный радиус оболочки; e – эксцентриситет в выражении [6]

* Рисунки приведены из монографии А.С. Вольмира [5]

$$P(t) = \frac{16 \rho_o}{27 D} \left[\frac{\delta_o + R_o \pm e - R(t)}{t} + \frac{dR}{dt} \right]^3, \quad (1)$$

где $P(t)$ – давление, действующее на внешнюю поверхность оболочки;

ρ_o – плотность взрывчатого вещества (ВВ);

D – скорость детонации ВВ;

δ_o – толщина заряда ВВ;

R_o – внешний радиус оболочки в начальный момент времени;

$R(t)$ – текущий радиус оболочки.

Начальное возмущение (волнообразование) задаем в виде ряда Фурье по синусам.

Метод расчета основан на представлении всей оболочки в виде модели (что соответствует конечно-разностному подходу к решению дифференциальных уравнений), в которой заготовка разбивается на участки, масса каждого участка сводится в точку, полученные узлы соединены невесомыми растяжимыми звеньями, которые остаются прямыми между точками сосредоточения масс, внешние силы рассматриваются сосредоточенными в каждой массовой точке. Задачу считаем геометрически линейной, материал заготовки – упруго-вязко-пластическим.

Выделяем элемент оболочки $R \times d\theta \times dS$ и рассматриваем его равновесие. Считаем, что на элемент действуют мембранные растягивающие (сжимающие) силы $N_{\theta i}$, $N_{\varphi i}$, поперечные силы $Q_{\varphi i}$, моменты $M_{\varphi i}$, $M_{\theta i}$. Уравнения движения (для узлов заготовки) имеют вид:

$$\frac{d}{dS} (N_{\varphi} R \cos \varphi) - \frac{d}{dS} (Q_{\varphi} R \sin \varphi) - N_{\theta} + F_r - \rho R \ddot{R} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{d}{dS} (N_{\varphi} R \sin \varphi) - \frac{d}{dS} (Q_{\varphi} R \cos \varphi) + F_z - \rho R \ddot{Z} = 0 \quad (3)$$

где S – координата по образующей профиля заготовки;

R – координата точки по оси OR ;

Z – координата точки по оси OZ ;

F_r – проекция внешней силы на ось OR ;

F_z – проекция внешней силы на ось OZ ;

N_{φ} – сила растяжения по образующей;

N_{θ} – сила растяжения по окружности;

Q_φ – поперечная сила;

φ – угол между осью OZ и касательной к профилю заготовки;

ρ – удельная масса заготовки (масса, отнесенная к площади).

Отметим, что условия равновесия сил записаны для массовых точек, стянутых в узлы модели, а уравнения моментов – для участка между массовыми точками. Уравнения (2) и (3) описывают движение многопараметрической модели заготовки. Принимаем во внимание деформации, связанные с удлинением элемента под действием мембранных сил, и деформаций, связанные с действием изгибных моментов. По координатам точек рассчитываем величины деформаций в узлах. Расчеты напряжений по деформациям основаны на зависимостях математической теории пластического течения. Поскольку уравнения движения записаны не для напряжений, а для усилий (что связано с тем, что модель учитывает изгиб, но не рассматривает сжимающие по толщине напряжения и касательные напряжения), то запишем соотношения для вычисления усилий и моментов.

$$N_\varphi^{i,j+1} = \sum_{l=1}^k \sigma_z^{i,j+1} \cdot \delta_e \quad (4)$$

$$N_\theta^{i,j+1} = \sum_{l=1}^k \sigma_\theta^{i,j+1} \cdot \delta_e \quad (5)$$

$$M_\varphi^{i,j+1} = \sum_{l=1}^k \sigma_z^{i,j+1} \cdot \delta_e \cdot f_k \quad (6)$$

$$M_\theta^{i,j+1} = \sum_{l=1}^k \sigma_\theta^{i,j+1} \cdot \delta_e \cdot f_k \quad (7)$$

где δ_e – толщина слоя пластины.

Величину преобразующей силы Q_φ определяем из уравнения равновесия моментов:

$$\frac{d(M_\varphi R)}{dS} - M_\theta \cdot \cos \varphi = Q_\varphi R \quad (8)$$

Цикл расчета повторяем до прекращения движения заготовки, когда пластические свойства материала приближаются к предельным.

Момент остановки заготовки определяется тогда, когда скорость перемещения узлов станет равной нулю. При этом следует заметить, что давление продуктов детонации действует на заготовку в течение времени

$$t_o = \frac{\delta}{a_m},$$

где a_m – скорость ударной волны в стенке оболочки.

По истечении этого времени внешняя нагрузка (давление продуктов детонации) приравнивается нулю. Заготовка двигается по инерции до полной остановки заготовки. В результате счета установлен характер перемещения узлов цилиндрической оболочки. При начальном возмущении в виде четырех симметричных волн с величиной прогиба $0,5\delta$ на окончательной стадии получили 16 гофр. Форма поперечного сечения цилиндрической оболочки на заключительной стадии деформирования до схлопывания гофров представлена на рис. 3.

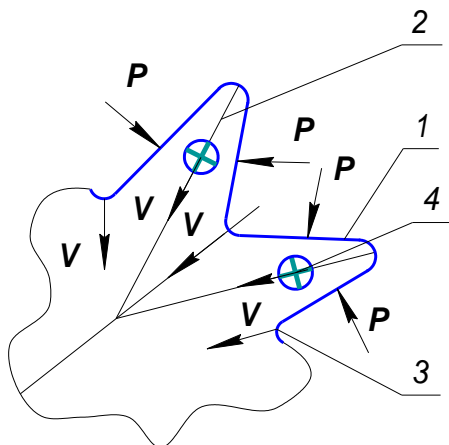


Рис. 3 – Форма поперечного сечения цилиндрической оболочки на заключительной стадии деформирования до схлопывания гофров (1 – стенка гофра; 2 – направление перемещения поперечных кумулятивных струй; 3 – направление перемещения выпуклости гофра; 4 – направление продольных кумулятивных струй)

Это объясняет эффект создания множества кумулятивных струй и их дисперсность. Наличие эксцентриситета сказывается на процессе гофрообразования, когда его величина превышает 10-12 толщин облицовки. При этом гофрообразование происходит с одной стороны цилиндрической облицовки.

Выводы. В результате моделирования процесса импульсного обжатия тонкостенной цилиндрической облицовки кумулятивного заряда взрывчатого вещества происходит гофрообразование, при котором гофры и их вершины

становятся источниками возникновения системы кумулятивных струй, при столкновении которых происходит образование пелены потока частиц (диспенсирование струи).

Моделирование процесса обжата позволило выявить новые технологии импульсного упрочнения и легирования цилиндрических деталей с использованием гофрированных облицовок кумулятивных зарядов взрывчатого вещества.

Список литературы: 1. *Соболев В. В.* Сверхглубокое проникновение микрочастиц в металлы / В. В. Соболев, С. М. Ушеренко, Н. В. Билан, Л. Ю. Чебенко // Журнал «Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва». – Науково-виробничий журнал: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Випуск 2 (10). – С. 96-105. 2. *Соболев В. В.* Закономерности изменения энергии химической связи в поле точечного заряда // Доклады НАН Украины. – 2010. – №4. – С. 88-95. 3. *Борисевич В. К.* Исследование возможности получения новых материалов при помощи импульсных сверхвысоких давлений / В. К. Борисевич, А. И. Долматов, И. В. Скорченко, А. И. Сабакар, В. В. Третьяк // Научно-технический журнал «Авиационно-космическая техника и технология». – Х. «ХАИ», 2012. – С. 7-10. 4. *Лаврентьев М. А.* Проблемы гидродинамики и их математические модели / М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат. – М.: Наука, 1973. – 416 с. 5. *Вольмир А. С.* Устойчивость деформируемых систем / А. С. Вольмир. – М.: Наука, 1967. – 984 с. 6. *Дерибас А. А.* Физика упрочнения и сварки взрывом / А. А. Дерибас. – Новосибирск: Наука, 1980. – 222 с.

Поступила в редколлегию 25.05.2014

УДК 621.9.06

В. Н. ПАВЛЕНКО, д-р техн. наук, доц., НАУ «ХАИ», Харьков

ИСТИРАНИЕ И СМЯТИЕ, КАК ДВА ВИДА ИЗНОСА ШТАМПОВОГО ИНСТРУМЕНТА

Статья посвящена результатам исследования распределения степени деформаций по объему деформируемых поковок методом координатной сетки. Установлено, что наиболее интенсивно элементы штампа искажаются в начальный период. Определено, что истирание и смятие являются основным видом износа штампового инструмента. Исследования показали о крайне неравномерное распределении деформаций по штампу, вследствие чего высокая неравномерность деформации снижает стойкость штампа.

Ключевые слова: высокоскоростное объемное деформирование, поковка, деформация, смятие, истирание, штамп.

Введение. Возможность использования высоких скоростей деформирования, быстроходность современных кузнечных машин и небольшое число необходимых относительно несложных технологических операций обуславливает кратковременность рабочего цикла и высокую производительность кузнечно-штамповочного производства. Кованые и штампованные изделия отличаются высокими механическими свойствами.

Материал кузнечного штампа работает в условиях, которые складываются в результате взаимодействия многих факторов [1,160]. Материал и температура исходной заготовки, технологическое оборудование, условия нагрева и охлаждения, темп штамповки, смазка и т. д. являются одинаковыми для многих штампов в пределах одного цеха и даже сходных по условиям работы предприятий. В то же время геометрия поковки, ее масса, распределение деформаций по ручьям, конструкция ряда элементов гравюры и особенно облойной щели, скорость скольжения материала поковки по поверхности гравюры, степень деформации, давление в полости штампа различаются для каждого конкретного процесса штамповки.

Удельная работа деформации, прямо пропорциональная действующим напряжениям и максимальной главной деформации, в большой мере определяет условия работы материала инструмента, а неравномерность распределения деформации и напряжений является основным фактором, определяющим стойкость штампов.

Целью работы является изучение распределения степени деформации по объему деформируемой поковки молотовых штампов при высоких скоростях деформирования.

Основная часть. Для изучения распределения степени деформации по объему деформируемой поковки использовался метод объемной координатной сетки. Поковка готовили к испытанию по алгоритму описанному в работе [3].

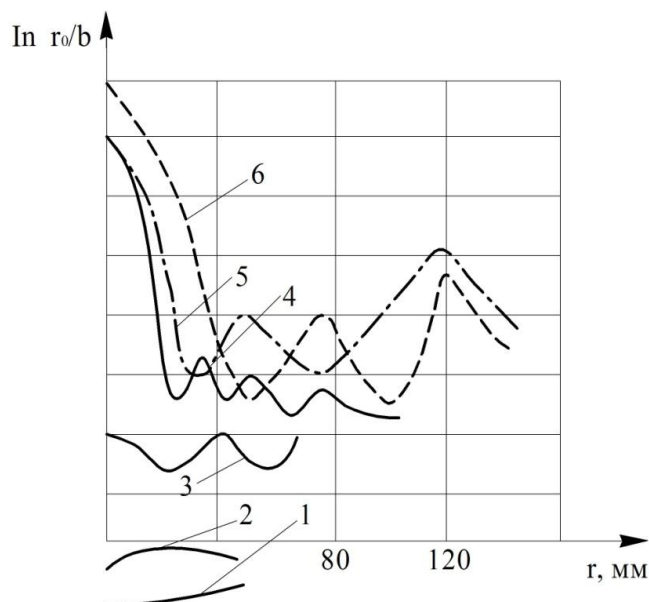


Рис. 1 – Распределение степени деформации после третьего удара

На рис. 1 показано распределение степени деформации по объему поковки за последний удар в чистовом ручье молотового штампа (r – радиус поковки после каждой проточки; r_0 – исходный радиус координатного стержня; b – малая полуось эллипса деформированного стержня).

Приведенные кривые свидетельствуют о крайне неравномерном распределении степени деформации в исследуемых поковках. Сравнение их с эпюрой износа штампа (рис. 2) показывает, что максимальное изменение размеров гравюры наблюдается на участках ее поверхности, где степень деформации максимальна. Этими участками являются бобышка и облойный мостик. Расчеты и экспериментальные исследования показывают, что нормальные напряжения в области фигуры штампа практически постоянны. Падение напряжений начинается только в пределах облойного мостика.

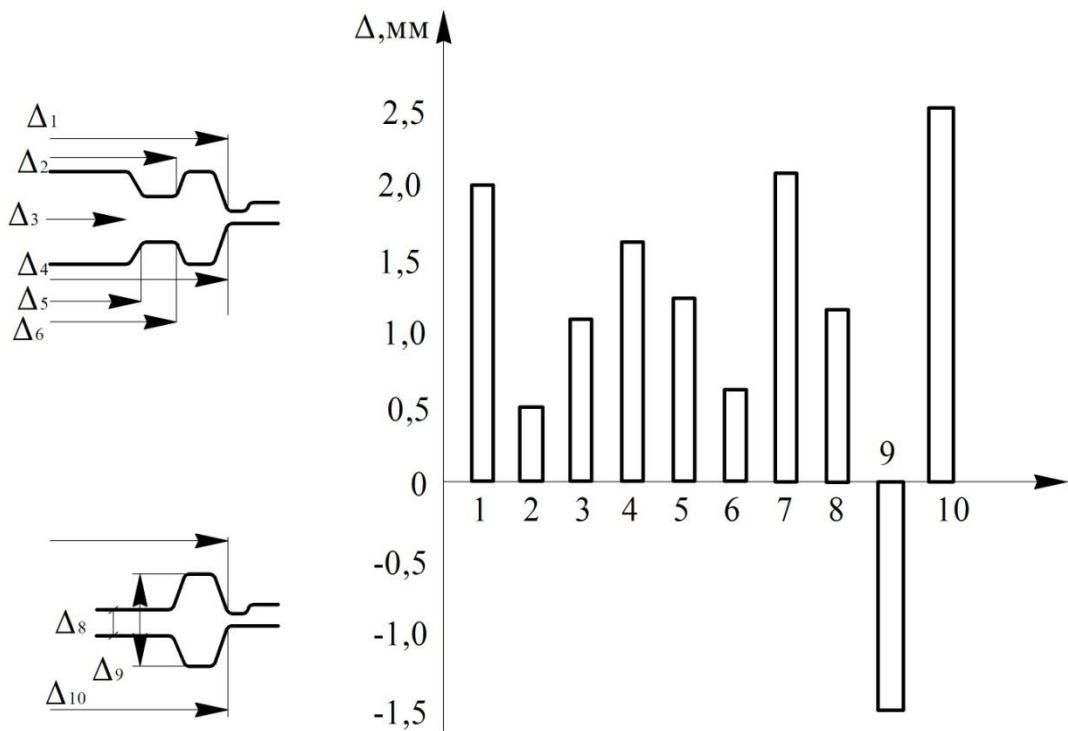


Рис. 2 – Изменение размеров Δ_{1-10} молотовых штампов к моменту выхода инструмента из строя (после изготовления 6000 поковок)

По вертикальному сечению они также постоянны, но значительно возрастают у выхода из полости штампа на облойный мостик, что является дополнительным фактором, ухудшающим условия работы гравюры в этой области.

Величина удельных усилий деформирования на поверхности штампа зависит от сопротивления деформированию штампуемого материала. Если при

температуре начала штамповки (1150°C) для большинства конструкционных сталей предел прочности колеблется в пределах $50\text{-}100\text{ МН/м}^2$, то к моменту конца деформации (около 800°C) он повышается до $100\text{-}250\text{ МН/м}^2$. Однако в полости штампа имеет место не линейная, а объемная схема напряженного состояния, что приводит к возрастанию сопротивления деформированию. Учитывая это обстоятельство, удельные усилия деформирования на поверхности гравюры могут повышаться до $250\text{-}450\text{ МН/м}^2$ на облойном мостике и до $600\text{-}1100\text{ МН/м}^2$ в полости штампа, а при деформировании легированных сталей даже выше.

Величина удельного усилия деформирования определяется также формой и размерами облойной щели. Уменьшение ее высоты по сравнению с оптимальным значением приводит к существенному повышению удельного усилия деформирования и снижению стойкости штампов.

Необходимо учитывать также тепловой эффект повышенных скоростей деформации. Так, например, при осадке на 60 % заготовки из малоуглеродистой стали с исходной температурой 1100°C средняя ее температура повышается при деформации на молотах на $35\text{-}45^{\circ}\text{C}$, на прессах – на $10\text{-}20^{\circ}\text{C}$. В случае жековки в штампах из-за неравномерности обжатия скорость деформации в отдельных зонах резко возрастает, что влечет за собой и повышение местного теплового эффекта. Увеличивается также скорость течения металла относительно поверхности гравюры, что также служит немаловажным источником локального повышения температуры. Значения скорости получены с использованием метода поверхностной координатной сетки.

Сопоставление скоростей течения с диаграммой износа штампа (рис. 3) показывает, что области максимальных износа и скорости течения совпадают в пределах облойного мостика. На поверхности фланца и особенно в области облойной щели скорость деформации максимальна, что также является причиной ускоренного износа.

Рассмотрение схемы износа молотового штампа, представленной на рис. 3, рис. 4, показывает, что существенное формоизменение гравюры отмечается не только в области выходной кромки и мостика, где максимальная скорость течения (например, точки 6, 7), но и у вершины бобышки, где скорость течения минимальная. Результаты обмера гравюры изношенного штампа, приведенные на незаштрихованной части диаграммы, свидетельствуют о том, что на отдельных участках имеет место не увеличение размеров полости, а, наоборот,

уменьшение их. Такое явление не свойственно износу в общепринятом понимании, связанному с потерей размеров за счет истирания рабочей поверхности. Следовательно, за формоизменение гравюры кузнечного штампа ответственно не только истирание, но и смятие, т. е. пластическая деформация инструмента. Природа их различна, поэтому и области максимального смятия и истирания не всегда совпадают. Таким образом, износ штампового инструмента (или изменение геометрии его гравюры) может быть представлен как истиранием (уносом частиц металла с поверхности трения), так и смятием (деформацией инструмента и, в первую очередь, поверхностного слоя гравюры в процессе штамповки).

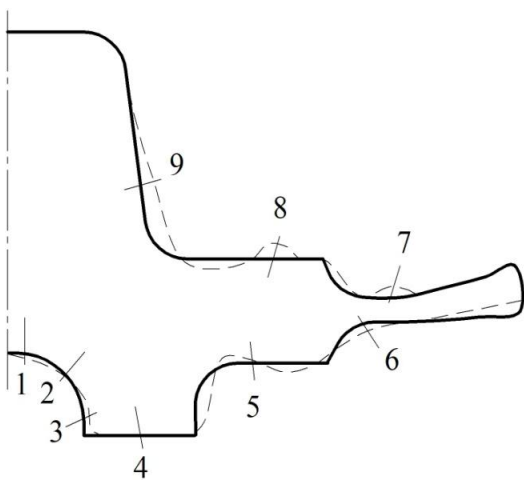
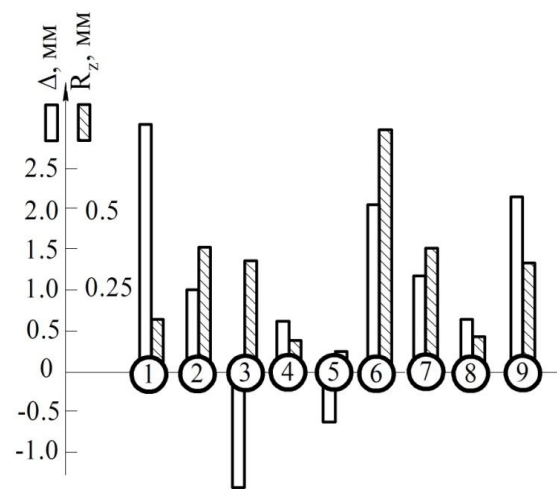


Рис. 3 – Схема износа молотового штампа

Рис. 4 – Изменение размеров Δ в молотовом штампе для точек 1 – 9, после изготовления 6000 поковок

Характер истирания – нормальный (окислительный), интенсивный с элементами схватывания и глубинного разрушения и промежуточный между ними – оказывает решающее влияние на состояние микрогеометрии рабочей поверхности. Это подтверждается данными заштрихованной части диаграммы, приведенной на рис. 5.

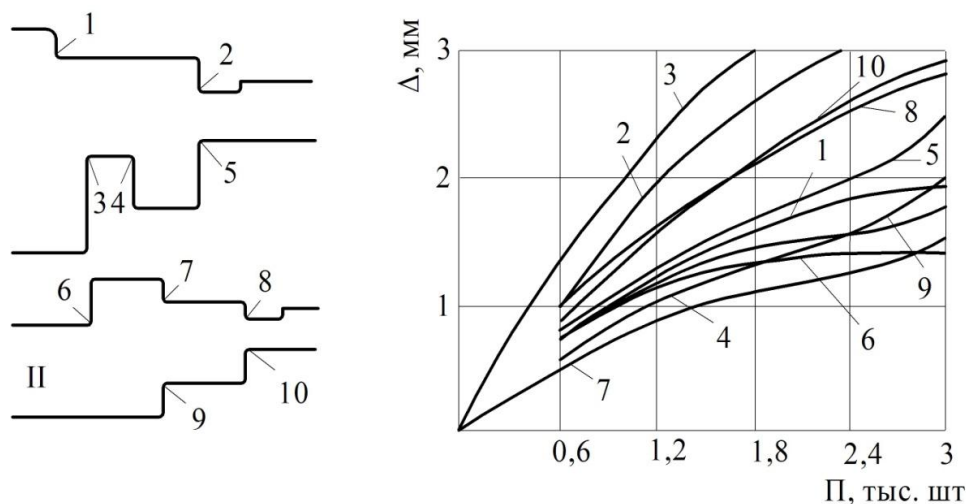


Рис. 5 – Износ внешних скруглений прессовых штампов типов I и II в зависимости от числа отштампованных поковок

Сопоставление изменения размеров гравюры и микронеровностей ее поверхности показывает, что на участках наиболее интенсивного истирания, как правило, имеет место также и наибольшая шероховатость. Однако, эта зависимость нарушается на участках гравюры, для которых характерно преимущественное изменение размеров за счет смятия. Смятие, в первую очередь, свойственно для выступающих участков гравюры, бобышек, внешних округлений, облойного мостика, вертикальных стенок.

Прочность штамповой стали и размеры элементов инструмента таковы, что, за исключением отдельных аварийных случаев, однократное воздействие рабочих усилий не может привести к значительной деформации штампа. Однако при многократном повторении нагрузки небольшие пластические деформации отдельных элементов штампов накапливаются, вызывая искажение формы гравюры.

Измерения (см. рис. 2, размер 9) показали, что глубина полости молотового штампа после съема 1000 поковок изменилась на 0,8-1,1 мм, что составляет около 2% от первоначального размера. Если считать, что при получении каждой поковки наносится 4-6 ударов, то относительная деформация за один удар составит 0,0005-0,0003%. Эта величина приблизительно соответствует пластической деформации стали вблизи предела упругости.

Рассмотрение кинетики изменения размеров гравюры (радиусов скруглений 1-10, рис. 5) показывает, что наиболее интенсивно элементы

штампа искажаються в початковий період роботи (600–1200 поковок). Затем имеет место тенденция к стабилизации размеров.

Истирание и смятие взаимодействуют в процессе износа гравюры кузнечного инструмента. Результат этого взаимодействия отображается кинетическими кривыми изменения размеров, которые для облойного мостика молотового штампа представлены на рис. 6. На каждой из них, например для зоны III мостика, можно различить три специфических участка износа. Для начального (α) характерно ускоренное формоизменение преимущественно за счет остаточной деформации, которая сопровождается некоторым наклепом поверхностного слоя. Микрогеометрия поверхности при этом изменяется относительно мало. Для участка β кривой характерна линейная зависимость изменения размеров. Износ происходит в основном за счет истирания рабочей поверхности. Нормальный, преимущественно окислительный, износ, характерный для первого участка кривой, сменяется все более интенсивным с элементами адгезионного взаимодействия и пластической деформации при заметном снижении твердости поверхностного слоя и повышении его пластичности. Качество поверхности заметно ухудшается. К концу этого периода отмечается все большее взаимодействие истирания и пластической деформации поверхностного слоя вследствие длительного теплового воздействия со стороны деформируемого металла.

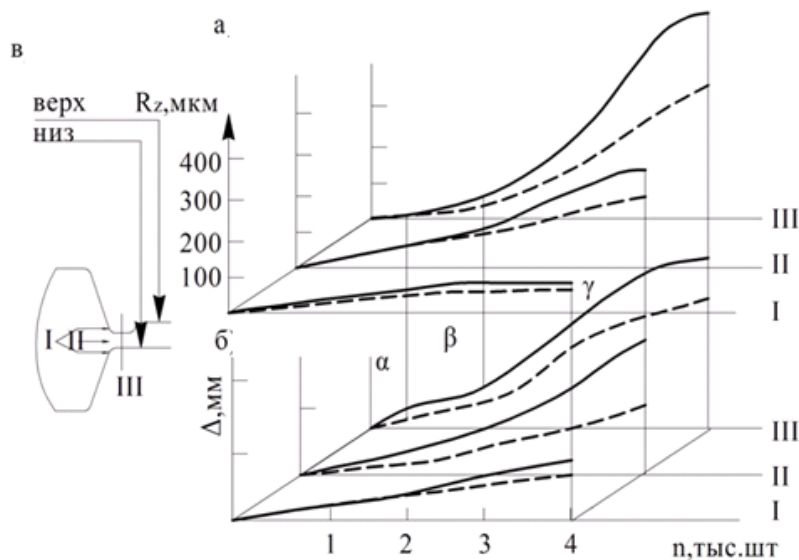


Рис. 6 – Изменение: а – микрогеометрии R_z ; б – размеров Δ молотового штампа; в – размеров молотового штампа в области облойного мостика (точки I–III) в зависимости от числа отштампованных поковок

Для участка γ характерно особенно интенсивное развитие износа, на величине которого сказываются не только описанные выше процессы, но и накопление в металле поверхностного слоя необратимых изменений, вызываемых явлениями механической и термической усталости. Начало этого участка, как правило, характеризуется появлением трещин термической усталости, развивающихся преимущественно в глубину или образующих сетку разгара в зависимости от температурно-силовых условий работы поверхностного слоя.

Выводы. В работе изучено два вида износа штампового инструмента, такие как истирание и смятие. Исследования показывают о крайне неравномерном распределении деформаций по штампу, вследствие чего высокая неравномерность деформации снижает стойкость штампа. Рассмотрение кинетики изменения размеров гравюры показывает, что наиболее интенсивно элементы штампа искажаются в начальный период работы (600–1200 поковок). Затем имеет место тенденция к стабилизации размеров. Рассмотрено взаимодействие истирания и смятия в процессе износа гравюры кузнечного инструмента.

Список литературы: 1. *Богуслаев, А. В.* О необходимости нанесения защитных покрытий на рабочие поверхности оснастки для штамповки и литья / А. В. Богуслаев // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2000. – Вып. 23 (6). – С. 48–55. 2. *Брюханов, А. Н.* Горячая штамповка. Конструирование и расчет штампов / А. Н. Брюханов, А. В. Ребельский. – М. : Машгиз, 1952. – 664 с. 3. *Долматов, А. И.* Повышение жизненного цикла оснастки на основе защитных технологий : монография / А. И. Долматов, А. В. Богуслаев. – Запорожье : Мотор Сич, 2000. – 295 с. 4. *Охрименко, Я. М.* Технология кузнечно-штамповочного производства : учеб. для вузов / Я. М. Охрименко. – Изд. 2-е перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1976. – 560 с. 5. *Ткачук, А. Н.* Термоупругие контактные задачи для элементов штампов и пресс-форм / А. Н. Ткачук, И. Я. Мовшович, Н. А. Ткачук // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2010. – № 1. – С. 19–28. 6. *Варданян, Э. Л.* Упрочнение матриц штампов комбинированной обработкой в вакууме / Э. Л. Варданян, И. И. Ягафаров, Р. Ш. Валиев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2012. – № 1. – С. 28–31.

Поступила в редколлегию 20.06.2014

УДК 621.92.001.5

А. А. АНДИЛАХАЙ, ГВУЗ ”ПГТУ”, Мариуполь;
С. А. ДИТИНЕНКО, канд. техн. наук, ХНЭУ, Харьков;
Ф. В. НОВИКОВ, докт. техн. наук, ХНЭУ, Харьков.

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ СОПЛА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ЗАТОПЛЕННЫМИ СТРУЯМИ

Приведены результаты экспериментальных исследований по установлению наиболее эффективной конфигурации сопла по критерию обеспечения максимального количества абразивных зерен,

А. А. Андилахай, С. А. Дитиненко, Ф. В. Новиков, 2014

инжектируемых в струю, истекающую в абразивную суспензию, на основе определения количества следов зерен на обработанных полированных латунных пластинах-экранах. Показано, что наиболее плотное расположение следов абразивных зерен обеспечивается при использовании сверхзвукового сопла Лавалья. Следовательно, применение сверхзвукового сопла Лавалья обеспечивает двойной эффект обработки: увеличение скорости потока и увеличение количества абразивных зерен, инжектируемых в затопленную струю сжатого воздуха.

Ключевые слова: абразивная обработка, абразивные зерна, сверхзвуковое сопло Лавалья, сжатый воздух, латунь, время обработки, профилограмма.

Введение. В настоящее время наиболее перспективным методом отделочной обработки мелких точных деталей (массой до 3 г) малой жесткости и сложной конфигурации является метод струйной обработки свободным абразивом. Однако этот метод обладает существенным недостатком, связанным с интенсивным износом сопел, через которые прокачивается абразивная суспензия.

В опубликованных работах предлагаются различные пути уменьшения интенсивности износа сопел струйного аппарата: изготовление сопел из таких материалов как резина, капрон, полиуретан, которые в меньшей степени подвержены абразивному износу; создание защитного слоя сопла, образованного истекающей жидкостью или сжатым воздухом, подаваемых отдельно от абразивного порошка и т.д. Однако добиться ощутимого результата при этом не удалось, т.е. оптимизация элементов конструкции струйного аппарата практически исчерпала себя. Поэтому кардинальным решением данной проблемы может быть изменение принципиальной схемы струйно-абразивной обработки за счет применения метода абразивной обработки деталей затопленными струями, который исключает основной недостаток струйно-абразивных установок – абразивный износ каналов сопел или эжекционных насадок, т.к. абразивные зерна присоединяются к струям сжатого воздуха за их пределами. Чтобы эффективно управлять данным процессом обработки и обеспечивать высокие показатели качества, производительности и стабильности обработки, необходимо знать его физические закономерности и технологические возможности. Эффективность метода зависит от геометрической формы сопла. Поэтому представляется актуальным проведение комплекса экспериментальных исследований конфигурации сопел по критерию максимального количества абразивных зерен, инжектируемых в струю, истекающую в абразивную суспензию.

Анализ последних достижений и литературы. Рассматриваемый в настоящей работе метод абразивной обработки деталей затопленными струями является, по сути, разновидностью метода струйно-абразивной обработки, который достаточно обстоятельно исследован и которому

посвящены многочисленные публикации [1-3]. Большой вклад в разработку теории и практики струйно-абразивной обработки внес проф. Проволоцкий А.Е. [1]. Однако в рассматриваемом в настоящей работе методе, в отличие от традиционной струйно-абразивной обработки, абразивные зерна присоединяются к струе сжатого воздуха за пределами сопла. Это вносит принципиальные изменения в закономерности съема материала и формообразования поверхностей обрабатываемых деталей. Поэтому настоящая работа является дальнейшим развитием работ [4, 5], посвященных исследованию этого прогрессивного метода обработки, выявлению и обоснованию его новых технологических возможностей.

Цель работы, постановка проблемы. Целью работы является обоснование условий повышения эффективности метод абразивной обработки деталей затопленными струями на основе определения оптимальной геометрической формы сопла.

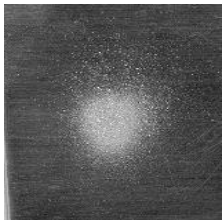
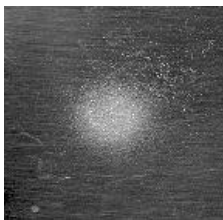
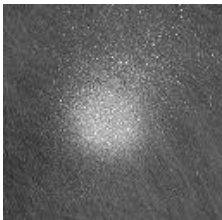

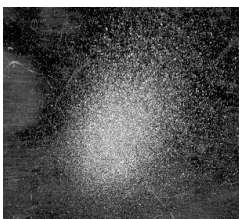

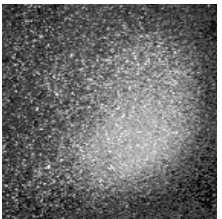
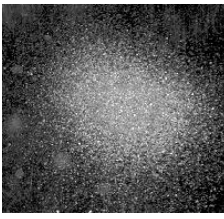



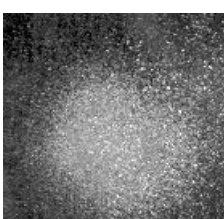




Материалы исследования. Для достижения поставленной цели в работе испытывались цилиндрические, конические расширяющиеся, конические сужающиеся и сверхзвуковые сопла Лавалья с длиной каналов 3, 6, 10 мм. Критерием выбора наилучшей конфигурации сопла является количество отпечатков абразивных зерен, инжектированных в струю после среза сопла на полированных латунных пластинах-экранах. Экраны устанавливали перед соплом на расстоянии 10, 20, 30 и 50 мм и удерживали неподвижно 5 секунд. Эксперименты выполняли на лабораторной установке с завихрителем (сопловым аппаратом), оснащенным сменными соплами и углублениями перед соплом на указанных расстояниях. Пластины, в виде экрана устанавливали перед соплом с помощью направляющего устройства (рис. 1), благодаря чему обеспечивалась точная выдержка периода 5 секунд и расстояние от среза сопла до экрана.



Рис. 1 – Внешний вид устройства для установки экрана перед соплом завихрителя на период, равный 5-ти секундам: а – положение над соплом (вне струи); б – перед соплом (в зоне действия струи)

Важним условием проведения опытов является постоянство концентрации абразивной суспензии и условий подачи абразивного материала в зону расположения испытуемого сопла. В связи с этим использовали завихритель с шестью соплами диаметром 2 мм и суспензию с количественным составом: 3 л воды и 0,18 л абразивного материала, в качестве которого использовали шлифзерно 63С (карбид кремния зеленый) зернистостью 63П (630 мкм). Конфигурацию и длины каналов сопел варьировали в соответствии с перечнем опытов по выявлению наибольшей скорости. В результате каждого опыта получали отпечатки абразивных зерен в виде пятна на полированной пластине.

Таблица. Сравнительная характеристика отпечатков абразивных зерен на полированных латунных образцах.

Расстояние до среза сопла, мм	Коническое расширяющееся сопло	Коническое сужающееся сопло	Цилиндрическое сопло	Сверхзвуковое сопло
10				
20				
30				
50				

Условия обработки: абразивный материал – шлифзерно 63С (карбид кремния зеленый), зернистость 63П (630 мкм); давление сжатого воздуха – 0,4 МПа; время обработки – 5 секунд.

Каждый образец фотографировали, а затем снимали профилограмму по линии, проходящей через центр пятна. В таблице приведены фотографии отпечатков абразивных зерен.

Результаты исследований. Из таблицы следует, что наиболее плотными по количеству следов на единицу площади являются отпечатки, полученные для сверхзвукового сопла Лавалья. Особенностью инъекции в струю, истекающую из этого сопла, является присоединение большего количества абразивных зерен уже в начале струи, т. е. на расстоянии 10 мм от среза сопла. Это объясняется отсутствием ядра струи в виде конуса на расстоянии 3–4-х диаметров канала сопла, т.е. на расстоянии 6–8 мм от среза сопла, характерного для цилиндрических и конических сопел. Профилограммы, снятые с участков сосредоточения следов абразивных зерен на полированных экранах записаны на электротермическую ленту с поперечным увеличением в 2000 раз и продольным – в 400 раз (рис. 2, рис. 3).

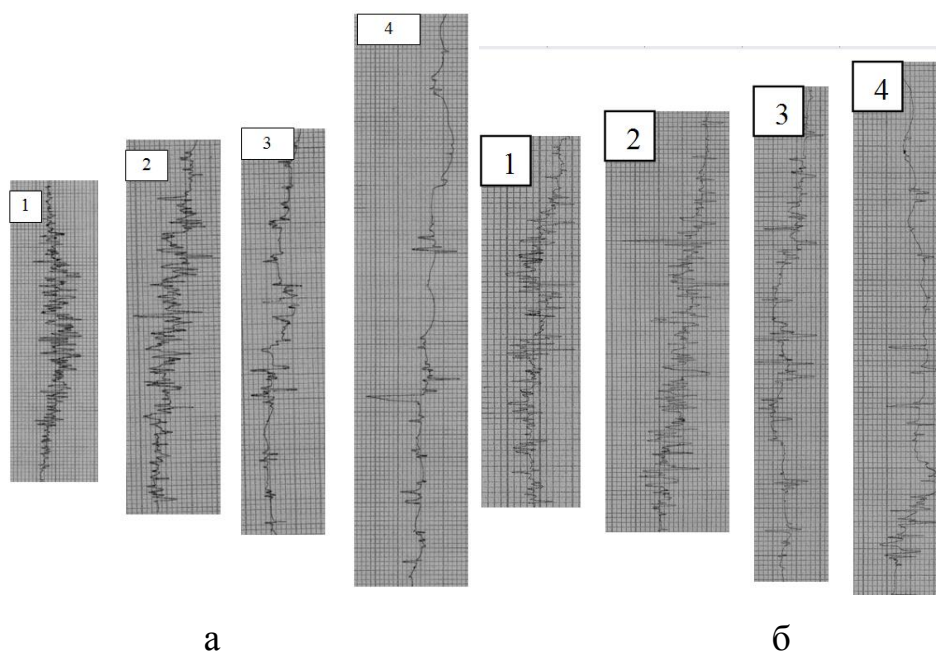


Рис. 2 – Профилограммы отпечатков абразивных зерен, присоединенных к струям, истекающим: а – из конического расширяющегося сопла и б – конического сужающегося сопла

Из четырех разновидностей профилограмм, снятых с обработанных латунных экранов, явно выделяются профилограммы с образцов, обработанных

из сверхзвукового сопла Лавалья. Характер профилограмм свидетельствует о том, что отпечатки имеют не только наиболее плотное расположение следов абразивных зерен, но наибольшую глубину, судя по размаху кривой.

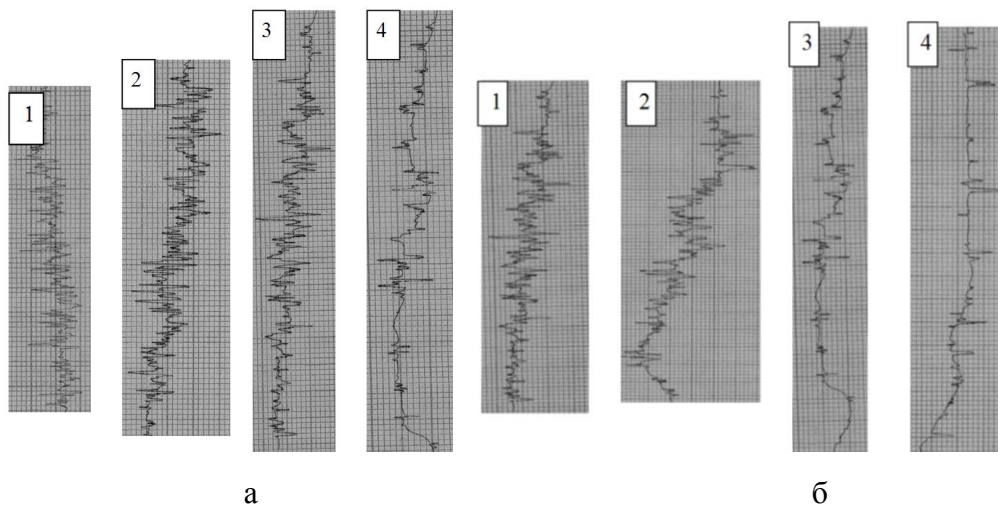


Рис. 3 – Профилограммы отпечатков абразивных зерен, присоединенных к струям, истекающим: а – из цилиндрического сопла и б – сверхзвукового сопла Лавалья

Выводы. Проведены экспериментальные исследования по установлению наиболее эффективной конфигурации сопла по критерию обеспечения максимального количества абразивных зерен, инжектируемых в струю, истекающую в абразивную суспензию, на основе определения количества следов зерен на обработанных полированных латунных пластинах-экранах. Показано, что наиболее плотное расположение следов абразивных зерен, которые также характеризуются и наибольшей глубиной, обеспечивается при использовании сверхзвукового сопла Лавалья. Следовательно, применение сверхзвукового сопла Лавалья обеспечивает двойной эффект обработки: увеличение скорости потока и увеличение количества абразивных зерен, инжектируемых в затопленную струю сжатого воздуха.

Список литературы: 1. Проволоцкий А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин / А.Е. Проволоцкий. – К: Техника, 1989. – 177 с. 2. Шманев В. А. Струйно-абразивная обработка деталей ГТД / В. А. Шманев, А. П. Шулепов, А. В. Мещеряков. – М.: Машиностроение, 1995. – 143 с. 3. Исупов М. Г. Разработка, исследование технологии струйно-абразивной финишной обработки: дис. ... докт. техн. наук: спец. 05.02.08 Технология машиностроения / Исупов Максим Георгиевич. – М.: РГБ, 2007. – 432 с. 4. Андилахай А. А. Абразивная обработка деталей затопленными струями / А. А. Андилахай. – Мариуполь: ПГТУ, 2006. – 190 с. 5. Андилахай А. А. Кинетическая энергия абразивного зерна, инжектированного в струю сжатого воздуха при истечении из сопла в суспензию / А. А. Андилахай // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. – Маріуполь: ПДТУ, 2012. – Вип. 24. – С. 224–230.

Поступила в редколлегию 18.06.2014р.

УДК 621.771

И. В. ДОБРОВ, д-р техн. наук, зав. кафедры прикладной механики
НМетАУ, Днепропетровск;

А. В. СЕМИЧЕВ, канд. техн. наук, доц., НМетАУ;

Б. О. НОВИКОВ, студент, НМетАУ;

Е. В. ГЕТЬМАН, студент, НМетАУ.

НОВЫЙ СПОСОБ АНАЛОГОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КИНЕМАТИКИ ПРОЦЕССА ОСАДКИ

Разработан метод аналогового моделирования кинематики процесса осадки симметричной заготовки плоским пуансоном с использованием пружины сжатия в условиях ее упруго-пластической деформации. Установлена взаимосвязь характера изменения скорости деформации заготовки при осадке с изменением шага витков пружины при ее динамическом нагружении. С использованием современных средств цифровой киносъемки и персональных компьютеров при анализе деформации витков пружины сжатия установлен характер изменения скорости деформации элементов заготовки по ее высоте. Полученные расчетные значения величин скоростей деформации заготовки качественно соответствуют результатам натурального эксперимента при осадке цилиндрической заготовки в производственных условиях.

Ключевые слова: аналоговое моделирование, осадка, пружина сжатия, упругая, пластическая деформация, скорость деформации.

Введение. Аналоговое моделирование процессов обработки металлов давлением представляет один из методов исследования процессов ОМД [1], к числу которых можно отнести метод моделирования кинематики процесса осадки с использованием упругой пружины сжатия [2], основанном на том принципе, что уравнения кинематики процесса деформации в теории упругости и теории пластичности описываются одними и теми же математическими уравнениями [3]. Вместе с тем, если учитывать, что отличие процессов упругой и пластической деформации состоит в том, что для идеально упругих тел после снятия нагрузки размеры тела и его элементов возвращаются в исходное состояние, а при идеально пластической деформации после снятия внешней нагрузки размеры тела и его элементов остаются такими, какими они были на момент прекращения действия внешней нагрузки, представляется возможность использовать для моделирования кинематики процессов обработки металлов давлением пружину, выполненную из материала с высокими пластическими свойствами. В этом случае расположение витков пружины после ее деформации моделирует формоизменение элементов материала заготовки по высоте заготовки, а использование современных средств цифровой кинокамеры и персональных компьютеров позволяет анализировать кинематику процесса деформации при осадке.

Цель и постановка проблемы. В работе приведено исследование закономерностей распределения скорости перемещения слоев материала заготовки при осадке на примере модели аналога в виде деформации пружины сжатия, выполненной из материала с высокими пластическими свойствами (неупругой пружины).

Материалы исследования. В работе [2] показано, что линейное распределение скорости деформации заготовки ($v_3(y)$) в направлении линии действия внешней силы (P_1) при осадке симметричной заготовки 1 плоским пуансоном 2 (см. рис. 1, а), которое описывает уравнение [3]

$$v_3(y) = -v_p \frac{y}{H_1} \quad (1)$$

где $v_p = \frac{\Delta H}{t_d}$ – скорость перемещения пуансона, определяющая скорость процесса деформации при осадке исходной заготовки высотой H_0 до высоты H_1 за время осадки t_n , в течении которого размеры заготовки изменяются на размер $\Delta H = H_0 - H_1$ не соответствует реальной кинематике процесса осадки.

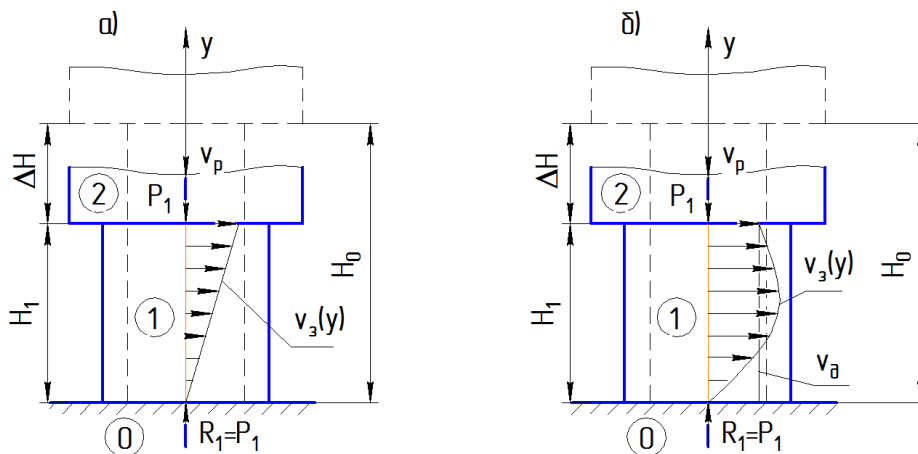


Рис. 1 – Схемы распределения скорости деформации заготовки по высоте заготовки при осадке: а – линейный закон, б – нелинейный закон

В работе [4] предложен закон изменения скорости деформации заготовки (см. рис. 1, б), который определяется из условия, что скорость процесса деформации заготовки равна средней скорости деформации заготовки

$$v_d = \frac{1}{H_1} \int_0^{H_1} v_3(y) dy. \quad (2)$$

Вместе с тем, исследование деформации упругой пружины сжатия для определения закона распределения кинематических параметров процесса осадки согласно уравнениям (1), (2), затруднительно т.к., если проанализировать диаграммы сжатия (см. рис. 2) реального образца материала заготовки [3] и соответствующие диаграммы сжатия пружин из упругого и пластического материалов, то необходимо отметить следующее:

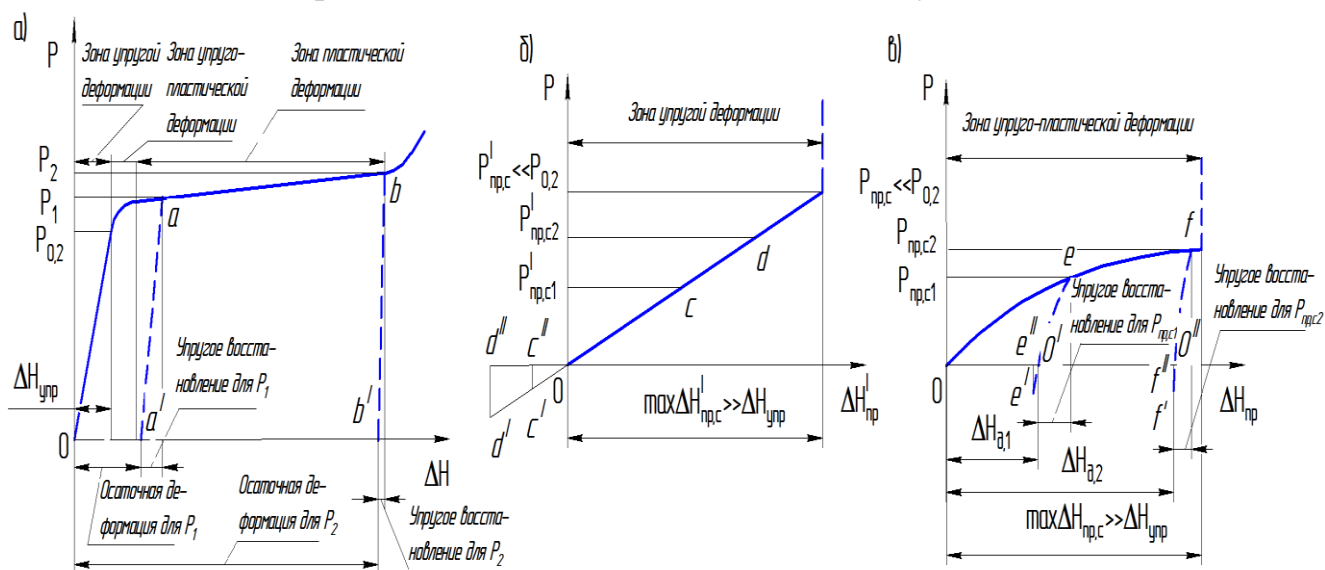


Рис. 2 – Диаграммы процессов сжатия и восстановления при деформации: а – образцов заготовки, б – упругой пружины, в – упруго-пластической пружины

– для реальных образцов материала заготовки (см. рис. 2, а) в процессе осадки протяженность зоны упругой деформации ($\Delta H_{упр}$) не более 5% от зоны пластической деформации образца и при снятии внешней нагрузки P_1 или P_2 , которые превышают нагрузку предела упругости $P_{0,2}$, остаточная деформации образца определяется прямой aa' или bb' . При этом скорость прекращения действия внешней нагрузки (P_1, P_2) практически не оказывает влияния на изменение формы линии aa' или bb' , определяющих изменение действия внутренних сил в зоне упругого восстановления пластически деформированной заготовки;

– для упругой пружины сжатия (см. рис. 2, б) протяженность зоны упругой деформации определяется ее максимальным статическим сжатием ($max \Delta h'_{пр,с}$) до начала контакта витков пружины между собой, после чего

может происходить увеличение нагрузки без изменения размеров пружины (штрихпунктирная линия на рис. 2, б и рис. 2, в). В зависимости от характеристики пружины сжатия можно получить $\Delta H_{\text{п}} < \max \Delta h'_{\text{пр,с}} >> \Delta H_{\text{упр}}$ при значениях $P_2 \gg P'_{\text{пр,с2}} > P'_{\text{пр,с1}} \ll P_1$. В случае статической разгрузки пружины характер изменения положения торцевой поверхности наружного подвижного витка пружины будут определять линии $0c$ для $P'_{\text{пр,с1}}$ ($0d$ для $P'_{\text{пр,с2}}$), и в момент времени, когда внешняя сила будет равна нулю, получим $\Delta h'_{\text{пр,с}} = 0$ (пружина полностью восстановит свой исходный размер). При внезапном прекращении действия нагрузки $P'_{\text{пр,с2}}$ ($P'_{\text{пр,с1}}$) наружный торец подвижного витка пружины под действием упругих сил сжатых витков начнет ускоренно перемещаться вдоль прямой $0d$ ($0c$) и, за счет действия сил инерции этих витков, займет положение в точке d' (c') на продолжении прямой $0d'$ ($0c'$), растянув пружину сжатия на величину $0d''$ ($0c''$). Затем под действием упругих сил растянутых витков пружины и сил инерции витков пружины наружный торец подвижного витка начнет двигаться в противоположном направлении, осуществляя затухающие колебания относительно положения равновесия ($\Delta h'_{\text{пр,с}} = 0$). При этом каждый из витков пружины, в свою очередь, совершает колебания относительно «своего» положения равновесия в пружине, свободной от внешней нагрузки. Т. е. при незначительном изменении дополнительной нагрузки $\Delta P'_{\text{пр}}$ в каждый момент времени изменения динамической нагрузки $P'_{\text{пр,д}} = P'_{\text{пр,с}} + \Delta P'_{\text{пр}}$ имеет место различные колебания каждого из витков пружины, которые вносят свои искажения в определение закона кинематики процесса осадки на основании фотографии положения витков в текущий момент времени приложения нагрузки. В результате такого моделирования можно только установить, что скорость деформации заготовки не соответствует линейному закону изменения скорости деформации по высоте осаживаемой заготовки [2];

– диаграмма нагружения и разгрузки пружины из материала с высокими пластическими свойствами (см. рис. 2, в) представляет процесс деформации неупругой пружины сжатия в зоне упруго-пластичной деформации и сочетает в себе основные свойства характерные для деформации образца при осадке и сжатия упругой пружины: $\max \Delta h'_{\text{пр,с}} \gg \Delta H_{\text{упр}} > \Delta H_{\text{п}}; P_2 \gg P'_{\text{пр,с2}} > P'_{\text{пр,с1}} \ll P_1$;

остаточная пластическая деформация упруго-пластической пружины ($\Delta h_{д,с1}, \Delta h_{д,с2}$) после снятия статической нагрузки соизмерима с величиной упругого восстановления пружины при $\Delta h_{д,с1}$ или превышает ее при $\Delta h_{д,с2}$; в условиях динамического нагружения ($P_{пр,д} = P_{пр,ст} + \Delta P_{пр}$) величина $e' \theta'' \ll 0 d''$ ($f' \theta'' \ll 0 c''$) и процесс затухания колебания витков происходит более интенсивно, что позволяет анализировать изменения положения витков пружины при динамическом нагружении, сравнивая между собой фрагменты киносъемки в течении отрезка времени соизмеримого со временем изменения $\Delta P_{пр}$. На основании этих измерений возрастает точность определения скорости перемещения каждого из витков пружины, моделирующей изменение скорости деформации заготовки при осадке.

На рис. 3 представлены расчетные схемы изменения положения каждого из n витков пружины 1, установленной на направляющей 2 (см. рис. 3, а), в процессах статического (см. рис. 3, б) и динамического (см. рис. 3, в) нагружения пружины исходной высотой h_0 до размера $h_{l,c} = h_{l,d}$ грузом 3. При этом шаг витков пружины в исходном состоянии $t_{0,i} = const$ определяет исходную длину пружины $h_0 = \sum_{i=1}^n t_{0,i}$. Вследствие того, что при статической осадке неупругой пружины $P_{пр,с}(\Delta h) \neq const$ (см. рис. 2, в и рис. 3, б), то и жесткость этой

$$c_{пр,с} = \frac{P_{пр,с}(\Delta h)}{\Delta h} \neq const.$$

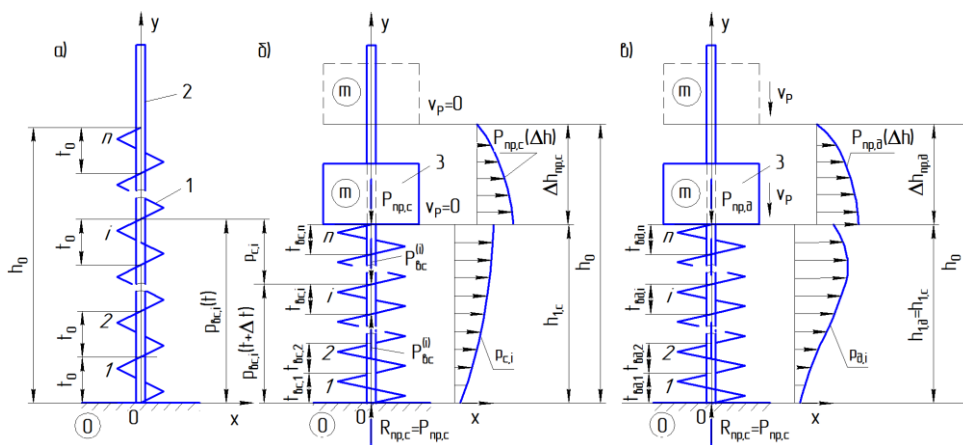


Рис. 3 – Схемы процессов деформации неупругой пружины сжатия: а – пружина до деформации, б – статическая деформация, в – динамическая деформация

Учитывая, что жесткость пружины из n витков представляет последовательное соединение n жесткостей каждого i -го витка пружины ($c_{в,i}$),

получим $\frac{1}{c_{пр,с}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{c_{в,i}} \neq const$ [5]. Откуда следует $c_{в,i} \neq const$ и деформация

каждого i -го витка сжатой пружины $\Delta h_{в,i} = \frac{P_{пр,с}^{(i)}}{c_{в,i}} \neq const$ ($P_{пр,с}^{(i)} = P_{пр,с}$ –

внутренняя сила, сжимающая i -ый виток пружины). Соответственно шаг витка

$t_{в,i} = t_{0,i} - \Delta t_{в,i} \neq const$, при этом, $\sum_{i=1}^n \Delta h_{в,i} = \Delta h$ и $\sum_{i=1}^n t_{в,i} = h_{л,с}$, а расстояние ($p_{с,i}$)

на котором находится каждый i -ый виток пружины (см. рис. 3 б) относительно своего первоначального положения до деформации определяется уравнением [2]

$$p_{в,i} = \sum_{i=1}^i (h_{0,i} - h_{в,i}) = y_{в,i}(t) - y_{в,i}(t + \Delta t_c) \quad (4)$$

где $y_{в,i}(t)$ и $y_{в,i}(t + \Delta t)$ – изменение координаты подвижного (верхнего) торца i -го витка пружины в системе координат xOy за время Δt_c статического нагружения пружины и $p_{в,i} > p_{в,i-1} > \dots > p_{в,1} > 0$ ($n \geq i \geq 1$). На рис. 3, б представлен качественный график распределения $p_{в,i}$ при нелинейной статической нагрузке $P_{пр,с}(\Delta h)$.

Очевидно, при динамическом нагружении неупругой пружины, когда $v_d = const$ и $h_{л,д} = h_{л,с} = h_l$, $\Delta h_{л,д} = \Delta h_{л,с} = \Delta h$ (см. рис. 3, в), учитывая условие (2), получим

$$\begin{cases} p_{вд,i} = \sum_{i=1}^i (h_{0,i} - h_{вд,i}); \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_{вд,i} = \Delta h = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_{в,i}, \end{cases} \quad (6)$$

и $p_{вд,i} \neq p_{вд,i-1} \neq \dots \neq p_{вд,1} > 0$. На рис. 3, в представлен качественный график распределения $p_{вд,i}$ при нелинейной динамической нагрузке $P_{пр,д}(\Delta h)$. В этом случае скорость перемещения i -го витка определяется уравнением

$$v_i = v_{вд,i} = \frac{p_{вд,i}(t) - p_{вд,i}(t + \Delta t_d)}{\Delta t_d}, \quad (7)$$

которое может быть преобразовано в уравнение

$$v_i = \frac{y_i(t) - \Delta y_i(t + \Delta t_d)}{\Delta t_d} = \frac{\Delta y_i(t)}{\Delta t} \quad (8)$$

где $y_i(t)$ и $\Delta y_i(t + \Delta t_d)$ – изменение координаты подвижного (верхнего) торца i -го витка пружины в системе координат xOy за время $\Delta t = \Delta t_d \gg \Delta t_c$ динамического нагружения пружины.

Реализация кинематики процесса деформации неупругой пружины осуществлялась на установке рис. 4 [2]. Привод 4 при его вращении в направлении ω опускает груз 3 массой m ($mg \gg \max P_{пр,с}$, g - ускорение свободного падения) со скоростью $v_p = 40$ мм/с по направляющей 2 (см. рис. 4), обеспечивая динамическую нагрузку пружины 1 внешней силой

$$P_{пр,д} = c_{пр,д} (h_0 - y). \quad (9)$$

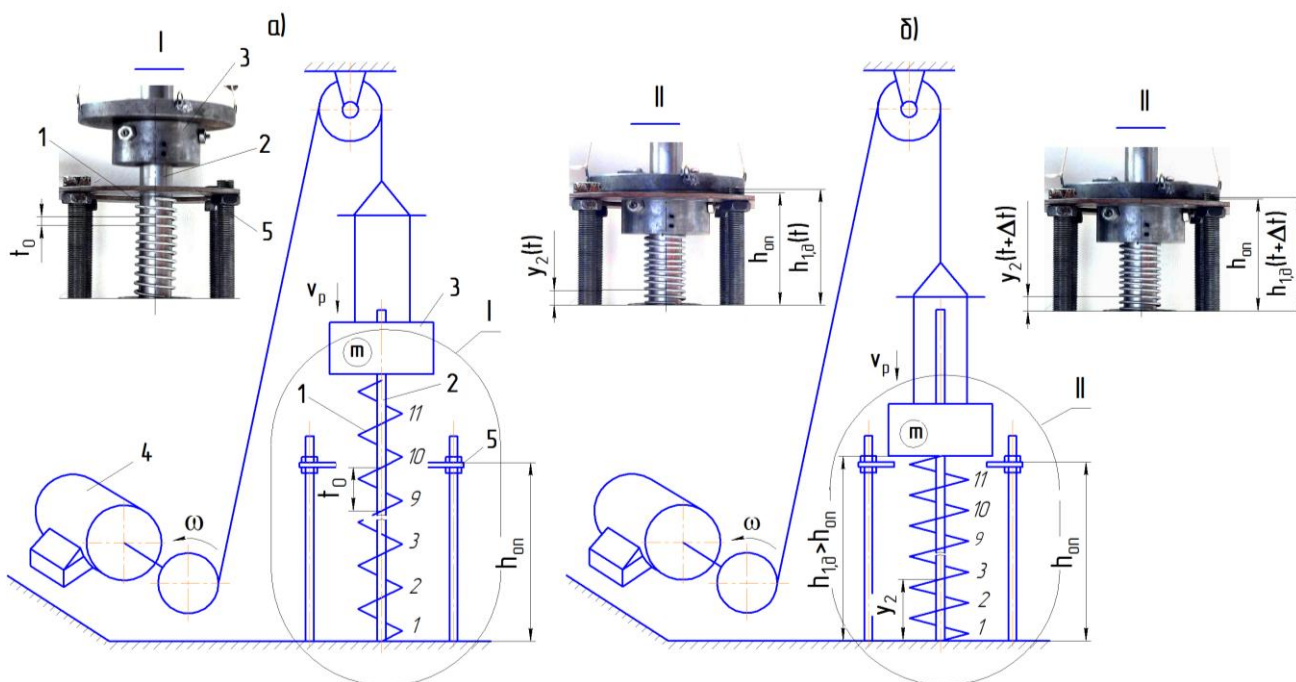


Рис. 4 – Схема установки динамического нагружения неупругой пружины сжатия и фрагменты киносъемки процесса деформации: а – до начала деформации, б – динамическая деформация в моменты времени t и $t + \Delta t$, в – окончание динамической деформации

Процесс равномерной деформации пружины в пределах $\Delta h_{пр,д} < \max \Delta h_{пр,с}$ обеспечивался за счет опоры 5 высотой $h_{он} = h_0 - \Delta h_{пр,д}$, на которую опускался груз 3 (см. рис. 4, в). Фрагменты киносъемки процесса динамического

нагружения пружины 1 анализировались при их воспроизведении в графическом редакторе: до начала динамического нагружения (см. рис. 4, а) и в условиях динамического нагружения (см. рис. 4, б), когда положения витков пружины на выноске II отличались друг от друга в течении отрезка времени $\Delta t = 0,03$ с (два смежных фрагмента при киносъёмке с частотой 30 кадр./с).

Результаты исследования. В табл. 1 представлены результаты исследования, которые позволили определить распределение перемещений ($\Delta y_i(y_i)$) и скоростей перемещений ($v_i(y_i)$) каждого витка пружины в процессе ее сжатия в виде уравнений [6].

Таблица 1. Перемещение витков пружины за время $\Delta t = 0,03$ с и скорость перемещения витков

Расстояние от опоры до верхнего торца витка пружины, мм	Номер витка пружины										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$y_i(t)$	8,86	16,98	24,77	32,9	39,68	46,45	53,23	61,69	69,48	76,08	83,89
$y_i(t+\Delta t)$	8,36	16,14	24,21	31,52	38,19	44,53	50,87	59,07	67,26	73,67	81,45
Расстояние от опоры до верхнего торца витка пружины, мм	Номер витка пружины										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Изменение расстояния витка пружины, мм $\Delta y_i(t)$	2,44	2,41	2,22	2,63	2,35	1,92	1,49	1,38	0,91	0,84	0,5
Скорость перемещение витка пружины v_i , мм/с	81,34	80,34	74	87,67	78,34	64	49,67	46	30,34	28	16,67

$$\Delta y_i(y_i) = 2 \cdot 10^{-7} x^4 - 3 \cdot 10^{-5} x^3 + 0,0007 x^2 + 0,0009 x + 2,348 \quad (10)$$

$$v_i(y_i) = 7 \cdot 10^{-6} x^4 - 0,001 x^3 + 0,0239 x^2 + 0,0296 x + 78,277 \quad (11)$$

Если принять (см. рис. 5, а), что при однородной деформации элементарной площади $abcd$ симметричной заготовки $ABCD$ ($\frac{ab}{ad} = \frac{AB}{AD} = 1$) в процессе ее осадки со скоростью v_p за время $\Delta t \rightarrow \delta t$ (δt – сколь угодно малое, но конечное значение отрезка времени) изменение размеров $abcd$, положение которой характеризуется координатой y при $x=0$, определяется из условия постоянства объема деформируемого материала. Откуда следует $\Delta y(x=0, y) = \Delta x(x=0, y)$. Так как $\Delta y(x=0, y) = v_y(x=0, y) \Delta t$ и $\Delta x(x=0, y) = 2v_x(x=0, y) \Delta t$, то изменение $v_y(x, y)$ (см. рис. 5, б) можно оценивать по результатам исследования осадки образца (см. рис. 5, в).

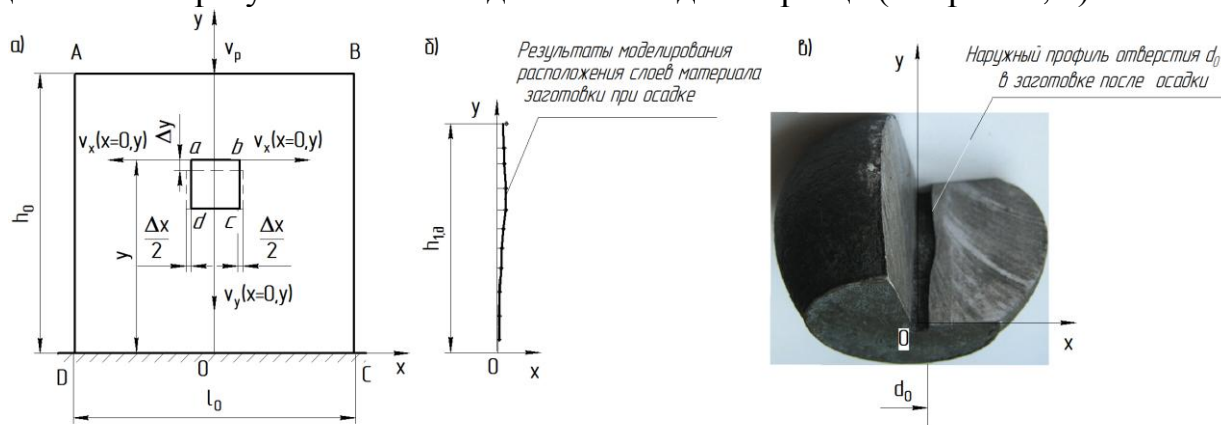


Рис. 5 – Сравнение результатов моделирования с экспериментом по осадке круглого образца: а – расчетная схема осадки, б – результаты моделирования кинематики осадки, в – результаты натурального эксперимента [7]

Анализ результатов исследования показывает качественное соответствие результатов моделирования и натурального эксперимента, что подтверждает нелинейный характер распределения скорости деформации заготовки в направлении осадки и обуславливает бочкообразование наружной поверхности заготовки.

Выводы:

1. Разработан метод аналогового моделирования кинематики процесса осадки симметричной заготовки плоским пуансоном с использованием пружины сжатия в условиях ее упруго-пластической деформации.

2. Проведенные исследования изменения расположения витков пружины при статическом и динамическом нагружении пружины внешней силой показали, что линейный закон распределения скорости деформации заготовки в направлении осадки заготовки не может быть реализован в процессах обработки давлением.

3. При динамическом нагружении пружины сжатия, что соответствует реальному процессу деформации заготовки, скорость деформации отдельных витков пружины в направлении действия внешней силы различна, и этим условием определяется кинематика процесса осадки, при которой происходит изменение геометрических размеров заготовки в плоскости симметрии. В этих условиях влияние внешнего трения на контактной поверхности заготовки и пуансона может только накладывать дополнительные условия на формообразование боковой поверхности заготовки при осадке.

Список литературы: 1. Абашков В. П. Классификация методов моделирования процессов обработки металлов давлением / В. П. Абашков, К. Н. Соломонов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2008. – № 9. – С. 25–28. 2. Добров И. В. Методика аналогового моделирования кинематики процесса осадки / И. В. Добров, А. В. Семичев, Б. О. Новиков, Е. В. Гетьман // Обработка материалов давлением. – 2014. – № 2(39). – С. 30–35. 3. Губкин С. И. Пластическая деформация металлов. В 3-х томах. Т. 1 / С. И. Губкин – М.: Металлургиздат, 1961. – 376 с. 4. Добров И. В. Исследование кинематики очага деформации осесимметричной заготовки при осадке плоскими бойками / И. В. Добров // Обработка материалов давлением. – 2013. – № 4(37). – С. 8–15. 5. Бидерман В. Л. Теория механических колебаний / В. Л. Бидерман – М.: Высшая школа, 1980. – 408 с. 6. Корн Г. А. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. А. Корн, Т. М. Корн – М.: Наука, 1974. – 832 с. 7. Markov O.E. Influence of Upsetting Operation on the Closure of the Axial Defects of Ingots / O.E. Markov, N.A. Rudenko // Plastic deformation of metals: сб. научных трудов в 2-х томах. – Днепропетровск: Акцент ПП, 2014. – Т.1 – с. 207–215.

Поступила в редколлегию 25.06.2014

УДК 621.923

Ф. В. НОВИКОВ, докт. техн. наук, ХНЭУ, Харьков;

Т. М. БРИЖАН, ГВУЗ ”ПГТУ”, Мариуполь;

А. Г. КРЮК, канд. техн. наук, ХНЭУ, Харьков;

О. С. КЛЕНОВ, канд. техн. наук, фирма “ДиМерус Инженеринг”, Харьков.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ И АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

В статье предложена математическая модель механики процесса резания и приведены аналитические зависимости для определения основных параметров силовой напряженности процесса резания, включая силу резания, энергоемкость обработки, коэффициент усадки стружки. Теоретически показано, что основным путем их уменьшения является улучшение условий стружкообразования за счет уменьшения радиальной составляющей силы резания, используя различные способы дробления

© Ф. В. Новиков, Т. М. Брижан, А. Г. Крюк, О. С. Кленов, 2014

стружки, снижая коэффициент трения обрабатываемого и инструментального материалов, изменяя угол схода стружки с передней поверхности резца и т.д.

Ключевые слова: механическая обработка, инструмент, обрабатываемый материал, сила резания, энергоёмкость обработки, коэффициент усадки стружки, производительность обработки.

Введение. Из всего разнообразия технологий обработки материалов, основанных на использовании различных видов энергии, необходимо выделить механические технологии обработки материалов резанием, которые характеризуются наименьшей энергоёмкостью и наибольшей производительностью обработки и обеспечивают высокие показатели качества и точности обрабатываемых поверхностей. Процессы резания материалов получили широкое применение в производстве и в ближайшие годы не утратят своей значимости. Вместе с тем, технологические возможности процессов резания используются не в полной мере, что связано с их недостаточной изученностью с точки зрения условий уменьшения параметров силовой напряженности процесса резания. В связи с этим актуальными являются задачи их дальнейшего исследования на основе разработки математической модели механики процесса резания, позволяющие с единых позиций оценить технологические возможности повышения производительности и качества обработки.

Анализ последних достижений и литературы. Вопросам механики процесса резания в научно-технической литературе уделено большое внимание [1-3]. Разработаны методики определения силы резания для различных видов обработки [4]. Однако, отсутствие аналитических зависимостей, увязывающих основные параметры силовой напряженности процесса резания, включая составляющие силы резания, энергоёмкость обработки, коэффициент усадки стружки и др., затрудняет анализ технологических закономерностей процесса резания и условий повышения его эффективности. В особой мере это относится к высокоточной обработке ответственных деталей, изготовленных из материалов с повышенными физико-механическими свойствами. Поэтому установление указанных аналитических зависимостей имеет большое теоретическое и практическое значение при решении задач повышения точности, качества и производительности механической обработки.

Цель работы, постановка проблемы. Целью работы является обоснование условий повышения процессов резания на основе аналитического определения и анализа параметров силовой напряженности процесса резания.

Материалы исследования. В основу работы положены результаты исследований [5], согласно которым тангенциальная P_z и радиальная P_y составляющие силы резания описываются зависимостями:

$$P_z = \sigma \cdot S = \frac{a \cdot b \cdot \sigma_{сж}}{K_{рез}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right); \quad (1)$$

$$P_y = \frac{\sigma \cdot S}{K_{рез}} = \frac{a \cdot b \cdot \sigma_{сж}}{K_{рез}^2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right), \quad (2)$$

где σ – энергоемкость обработки, Дж/м³ (или Н/м²):

$$\sigma = \frac{\sigma_{сж}}{K_{рез}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right) = \frac{\sigma_{сж}}{tg\beta}; \quad (3)$$

$S = a \cdot b$ – площадь поперечного сечения среза, м²;

a, b – толщина и ширина среза, м;

$\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м²;

$K_{рез} = P_z / P_y = tg 2\beta = ctg(\psi - \gamma)$ – коэффициент резания;

β – условный угол сдвига материала;

ψ – условный угол трения на передней поверхности инструмента ($tg\psi = f$ – коэффициент трения);

γ – передний угол инструмента.

Удельные составляющие силы резания описываются зависимостями:

$$P_{zуд} = \frac{P_z}{a \cdot b \cdot \sigma_{сж}} = \frac{1}{K_{рез}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right); \quad (4)$$

$$P_{yуд} = \frac{P_y}{a \cdot b \cdot \sigma_{сж}} = \frac{1}{K_{рез}^2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right). \quad (5)$$

Из зависимостей (4) и (5) следует, что параметры $P_{zуд}$ и σ идентичны, т.к. описываются одной и той же зависимостью. Анализ рассчитанных на основе зависимостей (4) и (5) значений $P_{zуд}$ и $P_{yуд}$, которые приведены на рис. 1а, показывает, что при условии $K_{рез} = 1$ параметры $P_{zуд}$ и $P_{yуд}$ равны между собой, а при условии $K_{рез} < 1$ и $K_{рез} > 1$ справедливы соответственно условия $P_{zуд} < P_{yуд}$ и $P_{zуд} > P_{yуд}$.

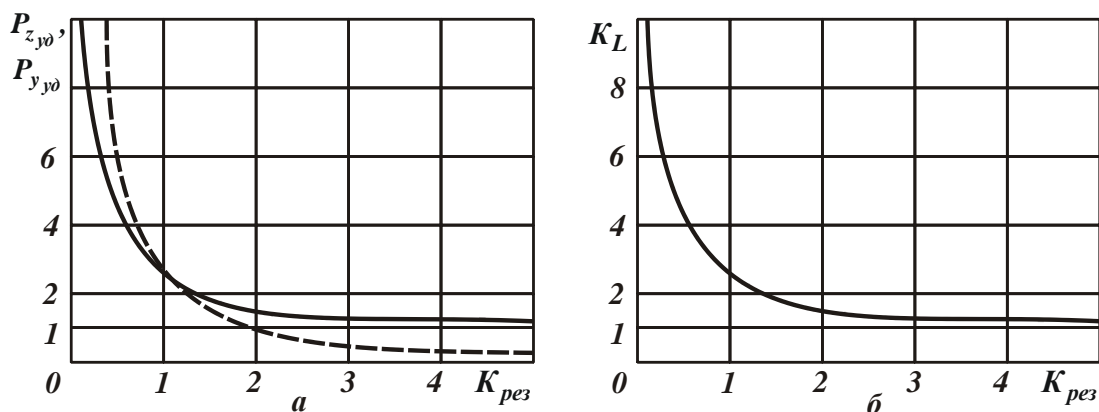


Рис. 1 – Зависимости: а – P_{zy0} (сплошная линия) и P_{yy0} (пунктирная линия) от $K_{рез}$ и б – K_L от $K_{рез}$

Как известно, условие $K_{рез} < 1$ реализуется при абразивной обработке, а условие $K_{рез} > 1$ – при лезвийной обработке [6]. Следовательно, при абразивной обработке наибольшее влияние на технологические параметры процесса оказывает радиальная P_y составляющая силы резания, а при лезвийной обработке – тангенциальная P_z составляющая силы резания. При этом составляющие силы резания при лезвийной обработке ($K_{рез} > 1$) меньше, чем при абразивной обработке ($K_{рез} < 1$), что свидетельствует о возможностях повышения точности и качества обработки при резании лезвийными инструментами. Данная закономерность обусловлена меньшими значениями условного напряжения резания $\sigma = P_{zy0}$, которое при условии $K_{рез} \rightarrow \infty$ стремится принять значения $\sigma_{сж}$. В этом случае условия стружкообразования соответствуют условиям разрушения прямолинейного образца при его сжатии.

С учетом известной формулы профессора тиме а.н.: $tg\beta = \frac{\cos\gamma}{K_L - \sin\gamma}$

зависимость (3) выразится:

$$\sigma = \sigma_{сж} \cdot \frac{(K_L - \sin\gamma)}{\cos\gamma}, \quad (6)$$

где K_L – коэффициент усадки стружки.

Поскольку $K_L \gg \sin\gamma$, а $\cos\gamma \approx 1$, то зависимость (6) в первом приближении может быть упрощена и представлена в виде:

$$\frac{\sigma}{\sigma_{сж}} = K_L. \quad (7)$$

Таким образом, показано, что энергоемкость обработки σ определяет коэффициент усадки стружки K_L : чем больше σ , тем больше K_L .

Подставляя зависимость (3) в (7), имеем:

$$K_L = \frac{1}{K_{рез}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right). \quad (8)$$

Зависимость (8) может быть разрешена относительно $K_{рез}$:

$$K_{рез} = \frac{2 \cdot K_L}{(K_L^2 - 1)}. \quad (9)$$

В таблице и на рис. 1. б приведены рассчитанные по зависимости (8) значения K_L . Как видно, коэффициент усадки стружки K_L резко уменьшается в диапазоне $K_{рез} < 1$ и незначительно изменяется в диапазоне $K_{рез} > 1$, неограниченно приближаясь к значению $K_L \rightarrow 1$. Следовательно, основные изменения K_L происходят в диапазоне $K_{рез} < 1$.

Таблица. Расчетные значения K_L

$K_{рез}$	0	1	2	3	4	5	10
K_L	∞	2,41	1,62	1,38	1,28	1,22	1,1

Результаты исследований. Исходя из приведенной зависимости $K_{рез} = P_z / P_y = \operatorname{tg} 2\beta = \operatorname{ctg}(\psi - \gamma)$, уменьшение коэффициента резания $K_{рез}$ связано с уменьшением условного угла сдвига обрабатываемого материала β за счет увеличения разности углов $(\psi - \gamma)$, т.е. Увеличения условного угла трения на передней поверхности инструмента ψ и уменьшения переднего угла инструмента γ . В особой мере это проявляется при шлифовании, когда угол γ становится отрицательным и зависимость для определения коэффициента резания принимает вид $K_{рез} = P_z / P_y = \operatorname{tg} 2\beta = \operatorname{ctg}(\psi + \gamma)$. В этом случае с увеличением угла $(\psi + \gamma)$ коэффициент резания $K_{рез} \rightarrow 0$. Этим объясняется более высокие значения составляющих силы резания P_z и P_y , энергоемкости обработки σ и соответственно коэффициента усадки стружки K_L , которые имеют место на практике при шлифовании. Исходя из сказанного, основными

путями увеличения коэффициента резания $K_{рез}$ и соответственно уменьшения параметров силовой напряженности процесса резания P_z , P_y , σ и K_L являются уменьшение угла ψ и увеличение положительного угла γ (при лезвийной обработке) и уменьшение отрицательного угла γ (при абразивной обработке). При резании алмазным лезвийным инструментом, характеризующимся наименьшим коэффициентом трения на передней поверхности инструмента, разность углов ($\psi - \gamma$) может быть существенно уменьшена, что приводит к увеличению коэффициента резания $K_{рез}$ и снижению параметров силовой напряженности процесса резания P_z , P_y , σ и K_L .

Заслуживает внимания факт, что значениями $K_L > 2$ соответствуют значения $K_{рез} < 1$. В этом случае $P_z < P_y$, что согласуется с результатами экспериментальных исследований при шлифовании. Однако при точении наблюдается противоположная закономерность: $P_z > P_y$ при $K_L > 2$ [1]. Данное несоответствие теоретических и экспериментальных результатов связано с тем, что тангенциальная составляющая силы резания P_z , описываемая зависимостью (1), определяет лишь условие сдвига обрабатываемого материала в условной плоскости сдвига и не учитывает трение сходящей стружки с передней поверхностью инструмента, тогда как экспериментально установленная тангенциальная составляющая силы резания P_z является результирующей, учитывающей как условия сдвига обрабатываемого материала в условной плоскости сдвига, так и процесс трения на передней поверхности инструмента.

В отличие от тангенциальной составляющей силы резания P_z , радиальная составляющая силы резания P_y , описываемая зависимостью (2), приблизительно равна ее экспериментальному значению. Поэтому между составляющими силы резания P_z и P_y , описываемыми зависимостями (1) и (2), существует сложная связь $P_z / P_y = K_{рез}$, где коэффициент резания $K_{рез}$ может принимать значения $K_{рез} < 1$ и $K_{рез} > 1$. Экспериментально установлено, что $P_z / P_y = 1 / f$, где f – коэффициент трения сходящей стружки с передней поверхностью резца ($f < 1$). Следовательно, при точении $P_z > P_y$, что соответствует условию $K_{рез} > 1$. Этим показано, что процесс резания подчиняется более сложным закономерностям и не может быть однозначно

представлен експериментально установленими составляющими силы резания, которые учитывают процессы резания и трения при стружкообразовании.

На основе проведенного анализа можно заключить, что основным условием повышения коэффициента резания $K_{рез} > 1$ и в целом эффективности обработки является уменьшение радиальной составляющей силы резания P_y , которая обусловлена интенсивным трением сходящей стружки с передней поверхностью резца. Это может быть достигнуто различными способами дробления стружки в зоне резания, снижением коэффициента трения обрабатываемого и инструментального материалов, применением так называемого косоугольного резания, обеспечивающего изменение угла схода стружки и т.д. Необходимо отметить, что в настоящее время на практике имеется большой арсенал технических решений по уменьшению радиальной составляющей силы резания P_y . Однако, все они основаны на эмпирическом представлении процесса резания, что не позволяет в полной мере раскрыть физические закономерности и технологические возможности процесса резания. Поэтому предложенная в работе математическая модель механики процесса резания позволит в определенной степени ликвидировать имеющийся место дисбаланс между теорией и практикой процесса резания и выявить новые технологические возможности повышения его эффективности.

Выводы. В работе приведены аналитические зависимости для определения основных параметров силовой напряженности процесса резания: силы резания, энергоемкости обработки, коэффициента усадки стружки. Теоретически показано, что основным путем их уменьшения является улучшение условий стружкообразования за счет уменьшения радиальной составляющей силы резания, используя различные способы дробления стружки, снижая коэффициент трения обрабатываемого и инструментального материалов, изменяя угол схода стружки с передней поверхности резца и т.д.

Список литературы: 1. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с. 2. Грановский Г.И. Резание металлов: учебник / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с. 3. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов / Н.Н. Зорев. – М.: Машгиз, 1956. – 368 с. 4. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т.Н. Лоладзе. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с. 5. 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. 6. Теоретические основы резания и шлифования материалов: учеб. пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков и др. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с.

Поступила в редколлегию 18.06.2014р.

УДК 621.923

Ф. В. НОВИКОВ, докт. техн. наук, ХНЭУ, Харьков;
А. Г. КРЮК, канд. техн. наук, ХНЭУ, Харьков;
И. А. РЯБЕНКОВ, канд. техн. наук, ГП ХМЗ “ФЭД”, Харьков;
И. Е. ИВАНОВ, ГВУЗ ”ПГТУ”, Мариуполь.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ АМПЛИТУДЫ АВТОКОЛЕБАНИЙ ПРИ ТОЧЕНИИ

В работе приведено аналитическое решение определения амплитуды автоколебаний, возбуждаемых при точении в результате трения задней поверхности инструмента с обрабатываемым материалом в связи с падающей характеристикой силы резания – трения от скорости резания. Теоретически обоснованы условия возникновения колебаний при точении и определены пути их устранения. Показано, что уменьшить амплитуду колебаний можно за счет существенного увеличения скорости резания, увеличения переднего угла резца и уменьшения площадки износа на его задней поверхности, применяя для этого, например, алмазные резцы.

Ключевые слова: точение, инструмент, автоколебания, амплитуда колебаний, сила резания, скорость резания, подача, площадка износа.

Введение. В условиях обработки материалов резанием в результате интенсивного механического взаимодействия инструмента с обрабатываемой заготовкой возбуждаются автоколебания, которые вызывают снижение точности, качества и производительности обработки, приводят к преждевременному выходу из строя инструмента. Поэтому определение условий их устранения или хотя бы уменьшения амплитуды колебаний является актуальной задачей.

Практика обработки материалов резанием показывает, что возбуждение незатухающих колебаний происходит, как правило, по мере затупления инструмента. В связи с этим важно проанализировать влияние величины площадки износа инструмента (резца) на его задней поверхности на условия возникновения автоколебаний при точении и обосновать условия их устранения.

Анализ последних достижений и литературы. Несмотря на многочисленные исследования, посвященные проблеме динамики резания металлов [1-6], в частности, определению условий возникновения автоколебаний, многие важные задачи динамики резания до настоящего времени не решены. Это свидетельствует об актуальности дальнейших исследований динамики процесса резания материалов. В особой мере это относится к обоснованию условий возбуждения и устранения автоколебаний от трения задней поверхности режущего инструмента с обрабатываемым материалом, которые имеют место при точении. Принято считать, что

самовозбуждение высокочастотных незатухающих колебаний (автоколебаний) происходит в связи с падающей характеристикой силы резания – трения от скорости или отставанием просто силы резания во времени от роста толщины среза. В данной работе следует рассмотреть первую причину.

Цель работы, постановка проблемы. Целью работы является обоснование условий уменьшения амплитуды колебаний при точении с учетом величины площадки износа инструмента на его задней поверхности.

Материалы исследований. Для решения поставленной задачи рассмотрено упрощенную динамическую модель инструмента в виде одномассовой системы, которая совершает движение под действием силы упругости системы – $c \cdot z$; силы сопротивления – $k_1 \cdot \dot{z}$; тангенциальной составляющей силы резания, действующей на передней (P_{z1}) и задней (P_{z2}) поверхностях лезвийного инструмента (рис. 1):

$$-c \cdot z - k_1 \cdot \dot{z} + P_{z1} + P_{z2} = m \cdot \ddot{z}, \quad (1)$$

где c – приведенные жесткость системы, Н/м;

m – приведенная масса системы, кг;

k_1 – коэффициент пропорциональности;

z, \dot{z}, \ddot{z} – соответственно перемещение, скорость и ускорение движения системы;

$P_{z2} = P_{y2} \cdot f$; $P_{y2} = F \cdot q$ – радиальная составляющая силы резания (сила трения), действующая на задней поверхности инструмента, Н;

$F = b \cdot h$ – площадь контакта задней поверхности инструмента с обрабатываемым металлом, м²;

h – величина износа инструмента по задней поверхности, м;

b – ширина среза, м;

q – радиальное давление, действующее на задней поверхности инструмента, Н/м²;

HV – твердость обрабатываемого материала (по Виккерсу), Н/м²;

f – коэффициент трения задней поверхности инструмента с обрабатываемым металлом.

В расчетной схеме (рис. 1, а) опора инструмента a неподвижна, обрабатываемая заготовка движется со скоростью резания (скольжения) V . Как известно, коэффициент трения f зависит от скорости скольжения инструмента по обрабатываемому металлу и изменяется по закону, показанному на рис. 2. Можно допустить, что в окрестности состояния равновесия в слабо нелинейных

системах (при определенной скорости резания V_0) коэффициент трения f описывается суммой [5]:

$$f = f_0 - f_0' \cdot \dot{z} + f_0'' \cdot \frac{\dot{z}^2}{2} - f_0''' \cdot \frac{\dot{z}^3}{6} + \dots, \quad (2)$$

где f_0, f_0', f_0'', f_0''' – значения функции f и ее производных по скорости резания.

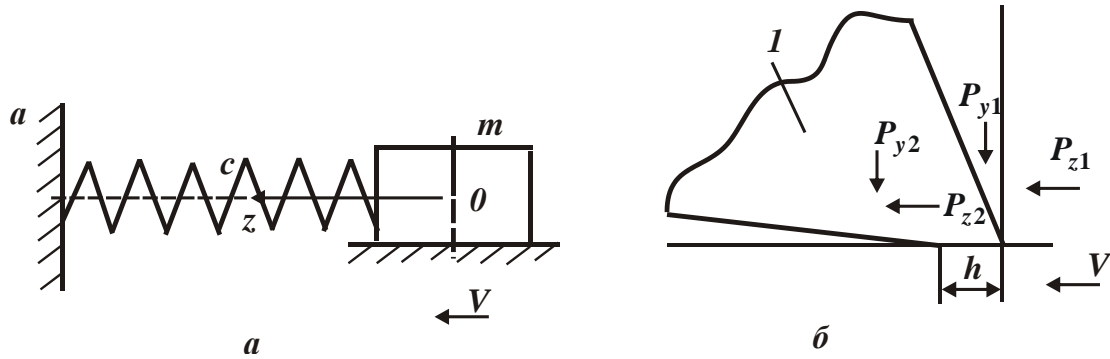


Рис. 1 – Расчетная схема: а – опора инструмента неподвижна; б – система сил, действующих на резец; 1 – резец

Подставляя зависимость (2) в (1) с учетом $z_0 = \frac{P_{z1} + P_{z20}}{c}$ и $\bar{z} = z - z_0$, имеем:

$$m \cdot \ddot{\bar{z}} + (P'_{z20} + k_1) \cdot \dot{\bar{z}} - P''_{z20} \cdot \frac{\dot{\bar{z}}^2}{2} + P'''_{z20} \cdot \frac{\dot{\bar{z}}^3}{6} + c \cdot \bar{z} = 0, \quad (3)$$

где $P'_{z20} = P_{y2} \cdot f_0'$; $P''_{z20} = P_{y2} \cdot f_0''$; $P'''_{z20} = P_{y2} \cdot f_0'''$.

В результате получено нелинейное дифференциальное уравнение, описывающее движение массы m . Сумма $(P'_{z20} + k_1)$ выполняет роль эффективного коэффициента вязкого трения. При положительном значении этой суммы колебания массы m с течением времени будут затухать. Положительное значение P'_{z20} достигается на правой ветви зависимости (рис. 2).

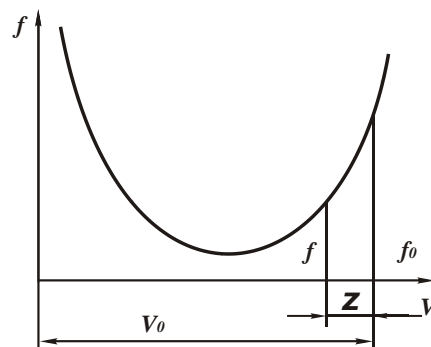


Рис. 2. – Зависимость f от V

При $(P'_{z20} + k_1 < 0)$ вязкое трение в системе отсутствует и масса m будет совершать незатухающие колебания (автоколебания). Этот случай возможен при отрицательном значении P'_{z20} , т.е. на левой ветви зависимости (рис. 2). Для решения уравнения (3) следует принять, что масса m совершает стационарные автоколебания по гармоническому закону $\dot{z} = A \cdot \sin k\tau$ с частотой свободных колебаний $k = \sqrt{\frac{c}{m}}$.

По методике, основанной на методе энергетического баланса и приведенной в работе [5], определена амплитуда автоколебаний:

$$A = \frac{2}{k} \cdot \sqrt{\frac{-2 \cdot (P'_{z20} + k_1)}{P'''_{z20}}}, \quad (4)$$

где P'''_{z20} – третья производная функции P_{z20} .

При отрицательном значении $(P'_{z20} + k_1)$, что соответствует неустойчивости системы, и при положительном значении P'''_{z20} подкоренное выражение (4) примет положительное значение. В этом случае система будет совершать автоколебания с амплитудой A . Амплитуда A тем больше, чем больше значение $(P'_{z20} + k_1)$ и меньше собственная частота системы k .

Важно проанализировать величину

$$(P'_{z20} + k_1) = (b \cdot h \cdot HV \cdot f'_0 + k_1) \quad (5)$$

при отрицательном значении f'_0 .

По мере износа инструмента по задней поверхности (увеличении h) величина P'_{z20} с течением времени увеличивается. В начальный момент обработки (при относительно небольших значениях h) выполняется условие $(P'_{z20} + k_1) > 0$ и автоколебания не возбуждаются. По мере роста h и P'_{z20} возможно условие $(P'_{z20} + k_1) < 0$ и в системе появятся автоколебания с возрастающей во времени амплитудой. В конечном итоге это приведет к прекращению процесса резания или поломке инструмента. Чем больше параметры b , HV , f'_0 , тем быстрее во времени увеличивается амплитуда автоколебаний.

С увеличением скорости резания в связи с увеличением температуры резания интенсивность износа инструмента по задней поверхности возрастает, что приводит к росту параметров h , P'_{z20} и соответственно A . Данная

закономерность справедлива для левой ветви зависимости (рис. 2). При скоростях резания, реализующих правую ветвь зависимости, автоколебания отсутствуют. Следовательно, с увеличением скорости резания амплитуда автоколебаний первоначально увеличивается, затем уменьшается до нуля, проходя точку максимума. С уменьшением переднего угла инструмента, как известно, увеличиваются сила резания, действующая на задней поверхности инструмента, и скорость его износа. Это ведет к росту параметров h , P'_{z20} и A , особенно при резании инструментом с отрицательным передним углом.

Величина подачи непосредственно на P'_{z20} не влияет. Однако, с увеличением подачи (за счет роста суммарной тангенциальной составляющей силы резания $P_z = P_{z1} + P_{z20}$) увеличивается статическое перемещение системы $z_0 = P_z / c$. Это уменьшает зазоры в стыках элементов технологической системы и увеличивает сопротивление (вязкое трения) k_1 . При достижении значений $|k_1| > |P'_{z20}|$ автоколебания в системе исчезают.

Сделанные теоретические выводы согласуются с известными экспериментальными данными, согласно которым при точении с увеличением ширины среза b и твердости обрабатываемого металла HV амплитуда автоколебаний увеличивается; с увеличением скорости резания амплитуда изменяется по экстремальной зависимости, достигая максимума, а с увеличением подачи – непрерывно уменьшается. Из зависимости (4) следует, что уменьшить величину P'_{z20} и исключить автоколебания можно уменьшением параметров $h \rightarrow 0$, $f_0' \rightarrow 0$ (применением, например, инструментов из синтетических сверхтвердых материалов, характеризующихся высокой износостойкостью и низким коэффициентом трения, практически не зависящим от скорости скольжения). Уменьшение ширины среза b приводит к уменьшению P'_{z20} , однако это связано с уменьшением производительности обработки, что не всегда экономически целесообразно. Важными резервами устранения автоколебаний, как отмечалось выше, являются увеличение скорости резания и подачи. Увеличение собственной частоты системы k , исходя из зависимости (4), позволяет уменьшить амплитуду автоколебаний A , что хорошо согласуется с практикой резания.

Полученные решения могут быть использованы для анализа условий устранения автоколебаний, возникающих при шлифовании. Например, экспериментально установлено, что при круглом шлифовании деталей с

высокопрочными наплавочными материалами с увеличением радиальной подачи в технологической системе возникают автоколебания. Исходя из полученных теоретических решений, это может быть связано с интенсификацией процесса трения связки абразивного круга с обрабатываемым материалом, что равносильно трению задней поверхности резца с обрабатываемым материалом. Как показано выше, наличие площадки износа на задней поверхности резца усиливает возбуждение автоколебаний. Поэтому основным путем снижения автоколебаний при шлифовании следует рассматривать обеспечение работы шлифовального круга в режиме самозатачивания с целью снижения интенсивности трения связки круга с обрабатываемым материалом. Иными словами, в этих условиях нецелесообразно применять абразивные круги, работающие в режиме затупления. Нецелесообразно также применять алмазные круги на высокопрочных металлических связках, эффективно использовать алмазные круги на относительно мягких органических и керамических связках, снижающих трение в зоне резания.

Выводы. В работе приведено аналитическое решение определения амплитуды автоколебаний, возбуждаемых при точении в результате трения задней поверхности инструмента с обрабатываемым материалом в связи с падающей характеристикой силы резания – трения от скорости резания. Теоретически обоснованы условия возникновения колебаний при точении и определены пути их устранения. Показано, что уменьшить амплитуду колебаний можно за счет существенного увеличения скорости резания, увеличения переднего угла резца и уменьшения площадки износа на его задней поверхности, применяя для этого, например, алмазные резцы. Обоснованы возможности исключения автоколебаний при шлифовании за счет обеспечения работы круга в режиме самозатачивания и снижения интенсивности трения в зоне резания.

Список литературы: 1. *Каширин А.И.* Исследование вибраций при резании металлов / *А.И. Каширин*. – М.: Изд-во АН СССР, 1944. – 262 с. 2. *Ташлицкий И.И.* Первичный источник энергии возбуждения автоколебаний при резании металлов / *И.И. Ташлицкий* // Вестник машиностроения. – 1960. – №2. – С. 45–50. 3. *Кудинов В.А.* Динамика станков / *В.А. Кудинов*. – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с. 4. *Жарков И.Г.* Вибрации при обработке лезвийным инструментом / *И.Г. Жарков*. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отдел, 1986. – 184 с. 5. *Пановко Е.Г.* Основы прикладной теории колебаний и ударов / *Е.Г. Пановко*, 4-е изд. – Л.: Политехника, 1990. – 272 с. 6. Качество и производительность абразивно-алмазной обработки: учебное пособие / *А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, А.А. Якимов*. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 212 с.

Поступила в редколлегию 20.06.2014

УДК 621.923

В. Г. ШКУРУПИЙ, канд. техн. наук, ХНЭУ, Харьков;
С. А. ДИТИНЕНКО, канд. техн. наук, ХНЭУ, Харьков.

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ЭФФЕКТ ПРОЦЕССА ПОЛИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ

Сформулированы основные условия уменьшения шероховатости поверхности при абразивном полировании. Показано, что эффективность полирования повышается с увеличением окружной скорости полировальника до 30 м/с (и выше) при одновременном снижении зернистости абразива. Установлено, что наличие в крупнозернистой доли фракции отдельных крупных зерен снижает качество обработанной поверхности (шероховатость) в силу наличия глубоких царапин. Для уменьшения времени обработки необходимо, чтобы зернистость абразива при полировании не превышала максимальную высоту микронеровностей исходной поверхности.

Ключевые слова: абразивная обработка, полирование, абразив, зернистость, скорость полировальника, обрабатываемая деталь, шероховатость поверхности.

Введение. Процессы абразивной обработки металлов (доводки, полирования и т.д.) широко применяются в машиностроении. Для формирования абразивного инструмента при доводке используют притиры, а при полировании – полировальники. Шаржирование твердых абразивов в притире выполняют двумя способами: путем принудительного шаржирования и свободным шаржированием в процессе обработки. Притиры изготавливаются из металлов (чугуна, стали, бронзы, меди, цинка) и неметаллических материалов. При выборе материала притира основными критериями являются материалы обрабатываемой детали и абразива, характер операции. Задачи доводочных процессов – обеспечение точности формы и размеров поверхностей, а полировальных процессов – минимизация значений высотных параметров шероховатости поверхности. Однако, как показывает практика, возможности полирования реализуются не в полной мере, что требует проведения дальнейших исследований.

Анализ последних достижений и литературы. Механизм резания при доводочных процессах описан в работе Кедрова С.М. [1]. По его мнению, при обработке поверхностей с намазкой притиров абразивной смесью, зерна, находящиеся между притиром и обрабатываемой поверхностью, внедряются в обе поверхности одновременно. В зависимости от формы и размеров зерен при относительном перемещении поверхностей может происходить перекатывание или сдвиг зерен. Это приводит к царапанию или выдавливанию ямок в обеих поверхностях. В более мягких материалах процесс шаржирования зерен более интенсивный. Влияние вязкой жидкости в составе абразивной смеси Кедров С. М.

сводит к препятствию сдвига абразивных зерен с поверхности притира и к гидродинамическому эффекту за счет создания масляных клиньев различной толщины. При этом от вязкости жидкости будет зависеть взвешенное состояние абразивных частиц.

Гребенщиков И.В. [2] предложил теоретическую модель полирования. Когда твердость абразива ниже твердости пленки окислов, образующихся под влиянием кислорода воздуха, тогда с обрабатываемой поверхности удаляется металл только в виде этой пленки. Если обрабатываемую поверхность подключить к аноду, то скорость образования пленок возрастет, и сопутствующие химические процессы положительно скажутся на эффекте процесса полирования. Вместе с тем, в указанных выше работах не выявлены факторы обработки, за счет изменения которых можно существенно повысить эффективность полирования. Поэтому задачи определения условий уменьшения высотных параметров шероховатости поверхности актуальны.

Цель работы, постановка проблемы. Целью работы является обоснование факторов, оказывающих наибольшее влияние на процесс полирования, и определение условий уменьшения высотных параметров шероховатости поверхности. Задача состоит в определении условий обработки, которые должны приводить к снижению времени полирования без появления глубоких царапин, т.к. при сглаживании поверхностного слоя появляются дефекты на полированной поверхности в виде глубоких царапин.

Материалы исследования. Эффект процесса полирования металлов определяется уровнем достигаемой производительности обработки, т.е. временем достижения заданных параметров шероховатости поверхности, а также сохранностью точности размеров и геометрической формы обрабатываемых поверхностей деталей. Производительность процесса определяет интенсивность процесса сглаживания при полировании. Управлять процессом образования поверхностного слоя можно путем воздействия на наиболее значимые факторы, оставляя без особого внимания менее значимые факторы. Каширин А.И. на основании своих исследований рекомендует не учитывать те технологические факторы, которые влияют на фактическую величину H_{max} в пределах до 5%.

Исаев А.И. [3], изучая доводочные процессы, обращает внимание на особую группу технологических факторов, влияющих на шероховатость поверхности. Эта величина и однородность размеров зерен абразива, скорость

резания и число «доводочных» проходов. Полирование с намазкой полировальников исследовал Кедров С.М. [1]. Изучая доводочные процессы, он обратил внимание на пропорциональное увеличение съема металла с увеличением давления притира. Однако влиянию давления притира на изменение параметров шероховатости поверхности было уделено меньше внимания. Проведенные нами эксперименты [4] показали, что при полировании давление полировальника должно быть значительно ниже, чем при доводке, – не более 5 Н/см^2 . Размер абразивных зерен оказывает значительное влияние на эффект полирования при всех его разновидностях. Для достижения минимальных значений высотных параметров шероховатости поверхности необходимо уменьшать размер абразивных зерен, обеспечивать однородность размеров и формы абразивных зерен, уменьшать количество зерен крупной части фракции применяемой зернистости. Понижение производительности процесса полирования может происходить из-за дробления абразивных зерен, а также увеличения загрязнения рабочей абразивной среды диспергированными отходами обрабатываемого материала.

На шероховатость обрабатываемой поверхности оказывает действие и материал полировальника. Проведенные нами эксперименты [5] показали, что для минимизации значений высотных параметров шероховатости поверхности необходимо применять на финишных операциях полирования пекоканифольные полировальники, которые обеспечивают параметр шероховатости поверхности $R_z \leq 0,025 \text{ мкм}$. Обработку свободным абразивом металлов с непрерывной подачей абразивной смеси исследовал Худобин Л.В. [6] и сделал вывод об эффективности увеличения скорости резания до 20 м/с . С увеличением размеров зерен абразива ухудшается и шероховатость обрабатываемой поверхности.

Эффективность процесса полирования повышается с увеличением окружной скорости полировальника до 30 м/с (и выше) при одновременном снижении зернистости абразива [4]. В связи с этим следует остановиться на анализе механизма резания-царапания при обработке металлов свободным абразивом. Как известно, в процессе обработки происходит микроцарапание обрабатываемой поверхности большим числом мельчайших абразивных зерен. Механизм процесса определяется геометрией абразивных зерен, характером движения зерен в процессе обработки, особенностью процесса резания-

царапання при полірованні, силами, розвиваючимися при резанні-царапанні, впливом вихідного стану поверхнового шару перед обробкою.

Геометрію абразивного зерна оцінюють: по кількості режущих кутів і виступів; по ступені гладкості поверхностей, утворюючих ці кути і виступи; по величині кутів виступаючих частей зерен; по радіусу закруглення кутів і виступів. Абразивні зерна, застосовувані для полірування металів, мають форму неправильних багатогранників, не мають виступів з точними кристаллографічними кутами, а завжди мають округлені вершини. Це підтверджують дослідження Ваксера Д.Б. [7] і Маслова Е.Н. [8]. Вимірювання кутів Ваксером Д. Б. показали, що вони змінюються в межах 100-130°. Значительно рідше зустрічаються кути 60-90°. Вершини всіх кутів досліджуваних зерен мають закруглення в межах від 6 до 50 мкм. З зменшенням розмірів зерен радіус закруглення зменшуються з меншою інтенсивністю, т.е. більш дрібні зерна мають відносно більшу закругленість граней, більший радіус закруглень виступів зерен. З зменшенням розмірів зерен радіус закруглення їх виступів змінюється непропорційно зменшенню розмірів зерен. Радіус закруглення зменшується в меншій ступені, ніж розміри зерен, т.е. відносна закругленість дрібних зерен вище, ніж більш великих.

Крім геометричних характеристик, вторим важливим фактором є характер руху абразивних зерен в процесі обробки вільним абразивом. В процесі полірування абразивні зерна, утримуючись в полірувальнику, ковзають по оброблюваній поверхності, частина з них різьміється в поверхню деталі, а частина, перекачуючись, здійснює мікропластичне деформування. Ступінь углублення зерен в оброблювану поверхню буде різною. Перекачуючись і соударючись, зерна відчувають значительні напруження, викликаючі їх дроблення на велике число дрібних частей зерен. Дроблення абразивних зерен в час їх руху ускладнює загальний характер руху зерен при полірованні. При полірованні металів вільним абразивом можуть зніматися дуже тонкі шари, досягаючі долей мікрометра. Поверхню округлення виступа зерна можна прийняти за частину еліпса, а ступінь гостроти кута можна характеризувати радіусом (рис. 1).

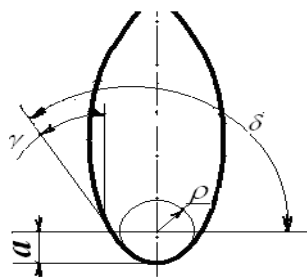


Рис. 1 – Схема к определению фактического переднего угла округления части зерна, которая выступает и царапает

Фактический передний угол будет определяться глубиной внедрения зерна. В зависимости от глубины погружения абразивного зерна величина фактического переднего угла определится по формуле:

$$\gamma = \arcsin \frac{(\rho - a)}{\rho}, \quad (1)$$

где a – толщина снимаемого слоя;

ρ – радиус округления царапающей части выступа зерна.

Угол резания-царапания (рис. 1) определяется зависимостью:

$$\delta = \frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{(\rho - a)}{\rho}. \quad (2)$$

Следующим важным фактором являются силы, развивающиеся при резании-царапании абразивным зерном, являющееся результатом сложного воздействия сил, изменяющихся в процессе обработки с изменением контактных взаимодействий зерна с обрабатываемой поверхностью. Изменение формы и полноты выступов зерен, вступающих в контакт, степень фиксации зерна в теле полировальника приводит к различной глубине внедрения в обрабатываемую поверхность. Этой глубиной внедрения будут определяться нормальная P_y и касательная P_z к обрабатываемой поверхности составляющие силы резания, воздействующей на неровность поверхности. Соотношение составляющих силы резания при полировании определяется, как и при доводочных процессах:

$$\frac{P_y}{P_z} = \frac{\sin \gamma - \mu \cos \gamma}{\cos \gamma - \mu \sin \gamma}, \quad (3)$$

где γ – фактический передний угол резания-царапания;

μ – коэффициент трения контактных поверхностей абразивного зерна и царапаемого металла.

Наступление процессов резания-царапания или смятия будет зависеть от соотношения a/ρ и физико-механических свойств обрабатываемого металла. Смятие металла может происходить по двум схемам: в виде единичного контакта при $P_{y\max}$ и $P_z \rightarrow 0$. В этом случае коэффициент трения контактных поверхностей зерна и обрабатываемого металла стремится к значению $\operatorname{ctg}\gamma$ (котангенсу фактического переднего угла). По второй схеме: смятие во время скольжения-выглаживания образует профиль царапины, показанный на рис. 2.

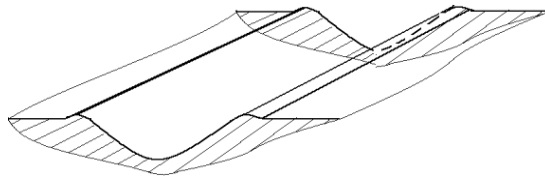


Рис. 2 – Профиль царапины

С увеличением пластичности металла величина боковых выступов будет возрастать и, следовательно, будет ухудшаться качество обработанной поверхности. В зависимости от формы абразивной частицы, она одна и та же может, скользя, выглаживать, пластически деформируя, поверхность металла, но, повернувшись выступом с меньшим углом и радиусом выступа произвести микроцарапание. В первом случае фактический угол резания будет стремиться к 180° , при этом резание становится невозможным и происходит смятие металла.

Из зависимости (3) следует, если $P_y \rightarrow 0$, то $\mu \rightarrow 0$ (контактное взаимодействие – отсутствует), если $P_z \rightarrow 0$, то $\mu \rightarrow \operatorname{ctg}\gamma \rightarrow 0$, $a \rightarrow 0$ – это вмятина (первая схема контактного взаимодействия). Отношение P_y/P_z увеличивается с увеличением фактического переднего угла. По достижению определенного максимального значения переднего угла это отношение резко возрастает и при условии $\mu \rightarrow \operatorname{ctg}\gamma$ стремится к бесконечности. В результате процесс резания-царапания переходит в процесс скольжения контактирующей выступающей части зерна. Нормальная составляющая силы P_y при этом вызывает пластическое отеснение металла без снятия стружки.

Результаты исследований. Анализируя рис. 1 и зависимость (3), можно сделать вывод, что с уменьшением коэффициента трения значение переднего угла контактирующей выступающей части зерна будет возрастать с переходом

в процесс скольжения. Снизить значение отношения P_y/P_z можно за счет уменьшения коэффициента трения, например, за счет применения СОТС.

На процесс полирования оказывает влияние реальная поверхность до обработки. Учитывая, что выступающие части зерна имеют смещения относительно направления их движения (рис. 3), обеспечиваемого полировальником, должна появиться вторая горизонтальная составляющая P_z , которая способствует зигзагообразному движению зерен и увеличивает вероятность их столкновения и дробления.



Рис. 3 – Схема беспорядочного расположения выступов зерна

На процесс полирования оказывает значительное влияние размер абразивных зерен. Количество абразивных зерен, находящихся в зоне резания зависит от размера зерен. Давление полировальника на обрабатываемую поверхность распределяется на количество опорных точек, зависящих от размеров абразивных зерен. С уменьшением размеров абразивных зерен резко уменьшается давление, приходящееся на каждое зерно, что приводит к тому, что глубина внедрения выступов зерен резко уменьшается и количество перекатывающихся зерен (долевое участие) увеличивается. Фактический угол резания при этом будет большим, что и приведет к скольжению зерен по обрабатываемой поверхности. В процессе полирования наряду с основной массой абразивных зерен, выступающие элементы которых образуют большие отрицательные углы в процессе царапания, имеются отдельные зерна с выступающими частями, которые должны в процессе царапания образовывать положительные передние углы. По данным Ваксера Д.Б., острые углы составляют 20-25% от их общего количества. Степень деформации металла в процессе царапания такими зернами должна быть значительно меньше. Однако, такие зерна больше подвержены дроблению в процессе полирования.

При полировании предпочтение следует отдавать более мелкозернистым абразивным материалам, так как с переходом на более мелкозернистые порошки уменьшается удельное давление, испытываемое каждым зерном,

находящимся между полировальником и обрабатываемой поверхностью, а это уменьшает степень углубления абразивных зерен в обрабатываемый материал и вызывает увеличение фактического переднего угла царапающего выступа зерна. Относительно большие радиусы закругления для мелкозернистых абразивов приводят к увеличению фактических передних углов, следовательно вероятность перекатывания мелкозернистых абразивов без срезания стружки значительно выше, а съём металла меньше, эффект полирования выше. Наличие в крупнозернистой доли фракции отдельных крупных зерен снижает качество обработанной поверхности (шероховатость) в силу наличия глубоких царапин, наносимых отдельными крупными зернами, для которых нормальная составляющая R_y значительно больше, чем для мелких зерен. Наличие таких царапин подтверждается снижением R_a/R_{max} полированных поверхностей [4, 9].

Выводы. 1. Эффективность процесса полирования повышается с увеличением окружной скорости полировальника до 30 м/с (и выше) при одновременном снижении зернистости абразива. В зависимости от формы абразивной частицы, она одна и та же может, скользая, выглаживать, сделать вмятину, пластически деформируя поверхность металла, но повернувшись выступом с меньшим углом и радиусом выступа произвести микроцарапание.

2. Наличие в крупнозернистой доли фракции отдельных крупных зерен снижает качество обработанной поверхности (шероховатость) в силу наличия глубоких царапин, снижая отношение R_a/R_{max} .

3. Для уменьшения времени обработки необходимо, чтобы зернистость абразива при полировании не превышала максимальную высоту микронеровностей R_{max} исходной поверхности.

Список литературы: 1. Кедров С. М. Средства повышения производительности доводки металлов / С. М. Кедров // Станки и инструмент, 1987. – №6. – С. 10-13. 2. Гребенищikov И. В. Роль химии в процессе полирования / И. В. Гребенищikov // Качество поверхности деталей машин: Сб. статей Всесоюзного научно-технического семинара. – М., 1957. – С.17-18. 3. Исаев А. И. Влияние температуры шлифования на изменение свойств поверхностного слоя деталей / А. И. Исаев, С. С. Силин // Труды МАТИ, 1969. – Вып. 38. – С 32-36. 4. Шкурупій В. Г. Підвищення ефективності технології фінішної обробки світловідбиваючих поверхонь деталей із тонкого листа і стрічок: автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.02.08 “Технологія машинобудування” / В.Г. Шкурупій. – Одеса, 2006. – 21 с. 5. Шкурупій В.Г. Исследование влияния условий абразивного полирования на изменение высотных параметров шероховатости поверхности / В. Г. Шкурупій // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. Випуск 5 (139). – Донецьк: ДонНТУ, 2008. – С. 134-139. 6. Худобин Л. В. Шлифование заготовок из коррозионностойких сталей с применением СОЖ / Л. В. Худобин, М. А. Белов. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1989. – 148 с. 7. Ваксер Д. Б. Пути повышения производительности абразивного инструмента при шлифовании / Д. Б. Ваксер. – М.: Машиностроение, 1964. – 123с. 8. Маслов Е. Н. Механизм работы абразивного зерна при шлифовании / Е. Н. Маслов. – В кн.: Основные вопросы высокопроизводительного шлифования. – М.: Машгиз, 1960. – 196 с. 9. Качество поверхности при

УДК 621.981:669.14

В. Г. ЗАГОРЯНСКИЙ, канд. техн. наук, доц., КрНУ
им. М. Остроградского, Кременчуг;

А. А. ШАПОВАЛ, канд. техн. наук, директор, НПП «Тангстен»,
Светловодск;

Д. В. МОСЬПАН, канд. техн. наук, докторант, КрНУ
им. М. Остроградского, Кременчуг.

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ИЗГИБЕ ДВУХСЛОЙНЫХ ЛИСТОВ ПЛАКИРУЮЩИМ СЛОЕМ НАРУЖУ

В статье, на основе анализа напряженного состояния двухслойных листов при пластическом изгибе плакирующим слоем наружу, разработана математическая модель, позволяющая определить распределение напряжений по толщине листа. На основе полученных зависимостей определяется радиус кривизны нейтральной поверхности напряжений, необходимый для определения изгибающего момента и предельных и допустимых радиусов гибки двухслойных листов. Полученные зависимости позволяют определять положение нейтрального слоя в двухслойных листах, изготовленных из любых металлов.

Ключевые слова: пластический изгиб, двухслойный лист, распределение напряжений, нейтральная поверхность напряжений, радиус кривизны.

Введение. Распределение по поперечному сечению изгибаемого листа растягивающих и сжимающих напряжений при гибке двухслойных листов (случай пластического изгиба моментом) влияет на положение нейтрального слоя напряжений.

В свою очередь, величина радиуса кривизны нейтрального слоя (линии, оси) напряжений (по терминологии Б.Н. Шевелкина [1] и других исследователей гибки двухслойных листов) или нейтральной поверхности напряжений (по терминологии [2]) определяет как значение изгибающего момента, так и значения предельных и допустимых радиусов гибки двухслойных листов. От значения радиуса нейтральной линии изогнутой заготовки зависит также длина заготовки (развертки) изгибаемой детали.

Анализ последних исследований и литературы. Отметим, что теоретической разработке проблемы определения параметров процесса пластической деформации при гибке листов двухслойных сталей и других биметаллов и соответствующим расчетным зависимостям уделялось недостаточное внимание. Освещались отдельные аспекты данной проблемы

(например, [3]). Традиционно освещались вопросы анализа напряженно-деформированного состояния (с учетом упрочнения при пластической деформации и без его учета) для процесса гибки монометаллов [2, 4, 5].

Цель исследования, постановка проблемы. Ставилась задача разработки математических зависимостей для распределения напряжений по толщине при изгибе моментом широкого двухслойного листа (полосы) для случая гибки плакирующим слоем наружу, на основе которых определяется радиус нейтральной поверхности напряжений.

Материалы исследований. Характер деформаций по толщине двухслойного листа (полосы), происходящих при его изгибе (аналогично изгибу листа (полосы) монометалла), определяет вид изгиба – упругий, упруго-пластический и пластический. Пластический изгиб может быть без упрочнения и с упрочнением.

При гибке широких листов или полос (ширина которых больше трех их толщин) имеет место объемно-напряженное и плоско-деформированное состояние, в связи с появлением аксиального (поперечного) напряжения σ_z . Еще одним положением является гипотеза плоских сечений, по которой перпендикулярные к срединной поверхности изгибаемого листа (полосы) сечения остаются плоскими при изменении кривизны полосы при изгибе.

В данной статье рассматривается случай пластического изгиба широкого двухслойного листа (полосы) плакирующим слоем наружу при чистом изгибе моментом без учета упрочнения и влияния анизотропии механических свойств изгибаемого листа (полосы).

Распределение напряжений по толщине изгибаемой двухслойного листа (полосы) находим из совместного решения уравнений равновесия элементарных объемов и энергетических условий пластичности.

Энергетическое условие пластичности для полярных координат, без учета упрочнения, принимаем в виде [5]:

$$\sigma_{\theta} - \sigma_{\rho} = \pm \beta \sigma_s, \quad (1)$$

где знак "+" относится к растянутой зоне в тангенциальном направлении ($\rho > \rho_{\sigma}$, ρ – текущий радиус, ρ_{σ} – радиус нейтральной поверхности напряжений), знак "-" относится к сжатой зоне в тангенциальном направлении ($\rho < \rho_{\sigma}$). Коэффициент β для плоского деформированного состояния равен 1,15 [2].

Тангенциальные напряжения σ_{θ} при $\rho_{\sigma} < \rho \leq R$, R – радиус наружной поверхности изгибаемого листа, будут положительными (растягивающими) и

при $r \leq \rho < \rho_\sigma$, r – радиус внутренней поверхности, отрицательными (сжимающими).

В радиальном направлении положительным будем считать направление от центра кривизны (для определения знака радиальных напряжений σ_ρ).

Рассмотрим случай гибки двухслойного листа или полосы плакирующим слоем наружу – плоский лист (полоса) изогнут на внутренний радиус r (рис. 1).

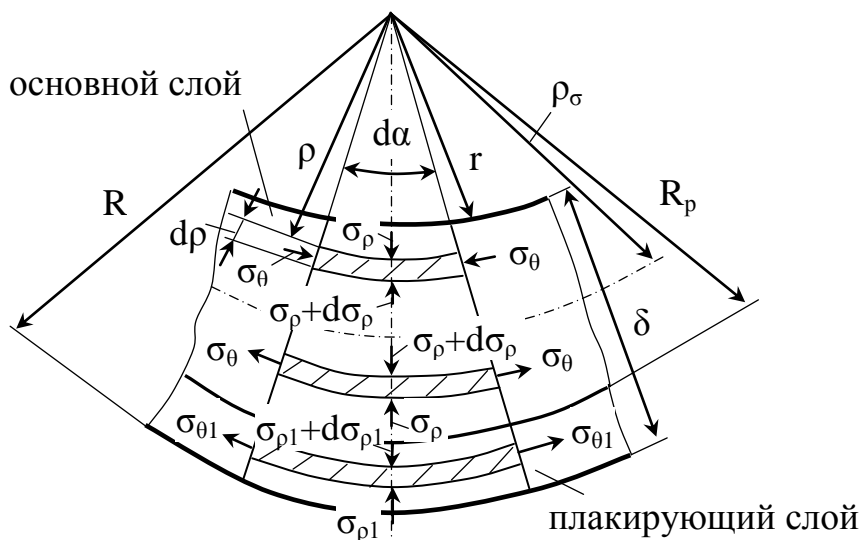


Рис. 1 – Схема напряженного состояния при изгибе двухслойного листа (полосы) – гибка плакирующим слоем наружу: R – радиус наружной поверхности; r – радиус внутренней поверхности; ρ – текущий радиус; ρ_σ – радиус нейтрального слоя напряжений; R_p – радиус поверхности раздела слоев (межслойной границы); σ_θ – тангенциальное напряжение; σ_ρ – радиальное напряжение; δ – толщина листа (полосы)

Запишем уравнение равновесия элементарного объема, расположенного в зоне растяжения в плакирующем слое (напряжения, относящиеся к плакирующему слою, будем отмечать индексом 1):

$$(\sigma_{\rho 1} + d\sigma_{\rho 1})\rho d\alpha - \sigma_{\rho 1}(\rho + d\rho)d\alpha + 2\sigma_{\theta 1}d\rho \sin \frac{d\alpha}{2} = 0 \quad (2)$$

Так как синус малого угла приблизительно равен радианной мере соответствующей дуги, то для малого значения угла $d\alpha$

$$\sin \frac{d\alpha}{2} = \frac{d\alpha}{2} \quad (3)$$

Тогда, после раскрытия скобок, зависимость (2) примет вид:

$$\sigma_{\rho 1}\rho d\alpha + d\sigma_{\rho 1}\rho d\alpha - \sigma_{\rho 1}\rho d\alpha - \sigma_{\rho 1}d\rho d\alpha = -2\sigma_{\theta 1}d\rho \frac{d\alpha}{2} \quad (4)$$

После преобразования получим

$$d\sigma_{\rho 1} = (\sigma_{\rho 1} - \sigma_{\theta 1}) \frac{d\rho}{\rho} \quad (5)$$

Уравнение пластичности для лакирующего слоя, находящегося в наружной (растянутой) зоне, в соответствии с уравнением (1):

$$\sigma_{\theta 1} - \sigma_{\rho 1} = 1,15\sigma_{s1}, \quad (6)$$

где σ_{s1} – напряжение текучести металла лакирующего слоя, соответственно далее σ_s – напряжение текучести металла основного слоя.

Подставляем выражение для $\sigma_{\theta 1}$ из (6) в уравнение (5):

$$d\sigma_{\rho 1} = \frac{d\rho(\sigma_{\rho 1} - 1,15\sigma_{s1} - \sigma_{\rho 1})}{\rho} = -1,15\sigma_{s1} \frac{d\rho}{\rho} \quad (7)$$

Интегрируем (7). Здесь имеет место неопределенный интеграл [6]

$$\int \frac{dx}{x} = \ln|x| + C, \quad x \neq 0 \quad (8)$$

Для отыскания произвольной постоянной интегрирования используют граничные условия, согласно которым для растянутой зоны напряжение σ_ρ будет равно нулю на наружной поверхности изгибаемого листа (при $\rho = R$), а для сжатой зоны σ_ρ будет равно нулю на его внутренней поверхности (при $\rho = r$) [2].

Таким образом, $\sigma_{\rho 1} = 0$ ($\sigma_{\rho 1} = -1,15\sigma_{s1} \ln|\rho| + C = 0$) при $\rho = R$, где R – наружный радиус гiba.

Постоянная интегрирования C будет равна

$$C = 1,15\sigma_{s1} \ln R, \quad (9)$$

тогда

$$\sigma_{\rho 1} = -1,15\sigma_{s1} (\ln \rho - \ln R) \quad (10)$$

Таким образом:

$$\sigma_{\rho 1} = -1,15\sigma_{s1} \ln \frac{R}{\rho} \quad (11)$$

Подставляя в уравнение пластичности (6) значение $\sigma_{\rho 1}$ из (11), получаем выражение для $\sigma_{\theta 1}$:

$$\sigma_{\theta 1} = 1,15\sigma_{s1} + \sigma_{\rho 1} = 1,15\sigma_{s1} - 1,15\sigma_{s1} \ln \frac{R}{\rho} = 1,15\sigma_{s1} \left(1 - \ln \frac{R}{\rho} \right) \quad (12)$$

Примем, что уширение листа при изгибе равно нулю, тогда аксиальные напряжения

$$\sigma_{z1} = \frac{\sigma_{\theta 1} + \sigma_{\rho 1}}{2} \quad (13)$$

Подставляем выражения для напряжений из (11) и (12). Аксиальное напряжение будет равно:

$$\sigma_{z1} = \frac{1,15\sigma_{s1} \left(1 - \ln \frac{R}{\rho}\right) - 1,15\sigma_{s1} \ln \frac{R}{\rho}}{2} = \frac{1,15\sigma_{s1}}{2} \left(1 - 2 \ln \frac{R}{\rho}\right) \quad (14)$$

Запишем уравнение равновесия элементарного объема, расположенного в **основном слое в зоне растяжения** (на рис. 1 заштрихованная область ниже нейтрального слоя напряжений)

$$(\sigma_\rho + d\sigma_\rho)\rho d\alpha - \sigma_\rho(\rho + d\rho)d\alpha + 2\sigma_\theta d\rho \sin \frac{d\alpha}{2} = 0 \quad (15)$$

Из (15), по аналогии с выводом зависимости (5), получаем:

$$d\sigma_\rho = \frac{d\rho(\sigma_\rho - \sigma_\theta)}{\rho} \quad (16)$$

Уравнение пластичности для основного слоя, находящегося в наружной (растянутой) зоне, в соответствии с уравнением (1):

$$\sigma_\theta - \sigma_\rho = 1,15\sigma_s \quad (17)$$

В (16) подставляем выражение для σ_θ из (17):

$$d\sigma_\rho = \frac{d\rho(\sigma_\theta - \sigma_\rho)}{\rho} = \frac{d\rho(1,15\sigma_s + \sigma_\rho - \sigma_\rho)}{\rho} = \frac{1,15\sigma_s d\rho}{\rho}, \quad (18)$$

После интегрирования и определения постоянной интегрирования С из условия $\sigma_\rho = \sigma_{\rho1}$ при $\rho = R_p$, где R_p – радиус межслойной границы между основным и плакирующим слоями, получаем:

$$\sigma_\rho = 1,15\sigma_s \ln \frac{R_p}{\rho} - 1,15\sigma_{s1} \ln \frac{R}{\rho}, \quad (19)$$

Подставляя в уравнение пластичности (17) абсолютное значение σ_ρ из (19), получаем выражение для σ_θ :

$$\sigma_\theta = -1,15\sigma_{s1} \ln \frac{R}{\rho} + 1,15\sigma_s \left(1 - \ln \frac{R_p}{\rho}\right) \quad (20)$$

Аксиальное напряжение, по аналогии с (15):

$$\sigma_z = \frac{1,15\sigma_s}{2} \left(1 - 2 \ln \frac{R_p}{\rho}\right) + 1,15\sigma_{s1} \ln \frac{R}{\rho} \quad (21)$$

Запишем уравнение равновесия элементарного объема, расположенного в зоне сжатия в основном слое (на рис. 1 заштрихованная область выше нейтрального слоя напряжений)

$$\sigma_\rho \rho d\alpha - (\sigma_\rho + d\sigma_\rho)(\rho + d\rho)d\alpha - 2\sigma_\theta d\rho \sin \frac{d\alpha}{2} = 0 \quad (22)$$

Из (22), по аналогии с выводом зависимости (18), получаем:

$$d\sigma_\rho = \frac{d\rho(-\sigma_\theta - \sigma_\rho)}{\rho} \quad (23)$$

Уравнение пластичности для основного слоя, находящегося во внутренней (сжатой) зоне, в соответствии с уравнением (1):

$$\sigma_\theta - \sigma_\rho = -1,15\sigma_s \quad (24)$$

В (23) подставляем выражение для σ_θ из (24):

$$d\sigma_\rho = \frac{d\rho(-\sigma_\theta - \sigma_\rho)}{\rho} = \frac{d\rho(1,15\sigma_s)}{\rho} \quad (25)$$

После интегрирования и определения постоянной интегрирования из условия $\sigma_\rho = 0$ при $\rho = r$, где r – радиус внутренней поверхности, получаем:

$$\sigma_\rho = -1,15\sigma_s \ln \frac{\rho}{r} \quad (26)$$

Подставляя в уравнение пластичности (25) абсолютное значение σ_ρ из (26), получаем выражение для σ_θ :

$$\sigma_\theta = -1,15\sigma_s \left(1 + \ln \frac{\rho}{r}\right) \quad (27)$$

Аксиальное напряжение, по аналогии с (14):

$$\sigma_z = \frac{-1,15\sigma_s}{2} \left(1 + 2\ln \frac{\rho}{r}\right) \quad (28)$$

Радиус кривизны нейтрального слоя напряжений определяется из условия равенства радиальных напряжений σ_ρ для границы зон растяжения и сжатия (когда текущий радиус ρ равен радиусу кривизны нейтрального слоя напряжений ρ_σ), то есть равенства зависимостей (19) и (26):

$$1,15\sigma_s \ln \frac{R_p}{\rho} - 1,15\sigma_{s1} \ln \frac{R}{\rho} = -1,15\sigma_s \ln \frac{\rho}{r}, \quad (29)$$

откуда

$$\rho_\sigma = \frac{\sigma_s}{\sigma_{s1}} \frac{Rr}{R_p} \quad (30)$$

Если нейтральный слой проходит межслойной границе ($\rho_\sigma = R_p$) и отношение $\sigma_s/\sigma_{s1} = 1$, то уравнение (30) превращается в зависимость для пластического изгиба монометалла [2]:

$$\rho_\sigma = \sqrt{Rr} \quad (31)$$

Проиллюстрируем полученные зависимости для определения радиальных и тангенциальных напряжений. В табл. 1 и 2 приведены значения, которые

принимают полученные зависимости в характерных точках (на наружной и внутренней поверхностях изгибаемого листа, на межслойной границе и на нейтральной поверхности напряжений).

Таблица 1. Значения радиальных напряжений в точках эпоры

Точка	Зависимость	Условие	Значение в точке
A	(11)	$\rho=R$	0
B	(11)	$\rho=R_p$	$-1,15\sigma_{s1} \ln \frac{R}{R_p}$
C	(19)	$\rho=\rho_\sigma$	$1,15\sigma_s \ln \frac{R_p}{\rho_\sigma} - 1,15\sigma_{s1} \ln \frac{R}{\rho_\sigma}$
D	(26)	$\rho=r$	0

Таблица 2. Значения тангенциальных напряжений в точках эпоры

Точка	Зависимость	Условие	Значение в точке
A	(12)	$\rho=R$	$1,15\sigma_{s1}$
B	(12)	$\rho=R_p$	$1,15\sigma_{s1} \left(1 - \ln \frac{R}{R_p} \right)$
C	(20)	$\rho=R_p$	$-1,15\sigma_{s1} \ln \frac{R}{R_p} + 1,15\sigma_s$
D	(20)	$\rho=\rho_\sigma$	$-1,15\sigma_{s1} \ln \frac{R}{\rho_\sigma} + 1,15\sigma_s \left(1 - \ln \frac{R_p}{\rho_\sigma} \right)$
E	(27)	$\rho=\rho_\sigma$	$-1,15\sigma_s \left(1 + \ln \frac{\rho_\sigma}{r} \right)$
F	(27)	$\rho=r$	$-1,15\sigma_s$

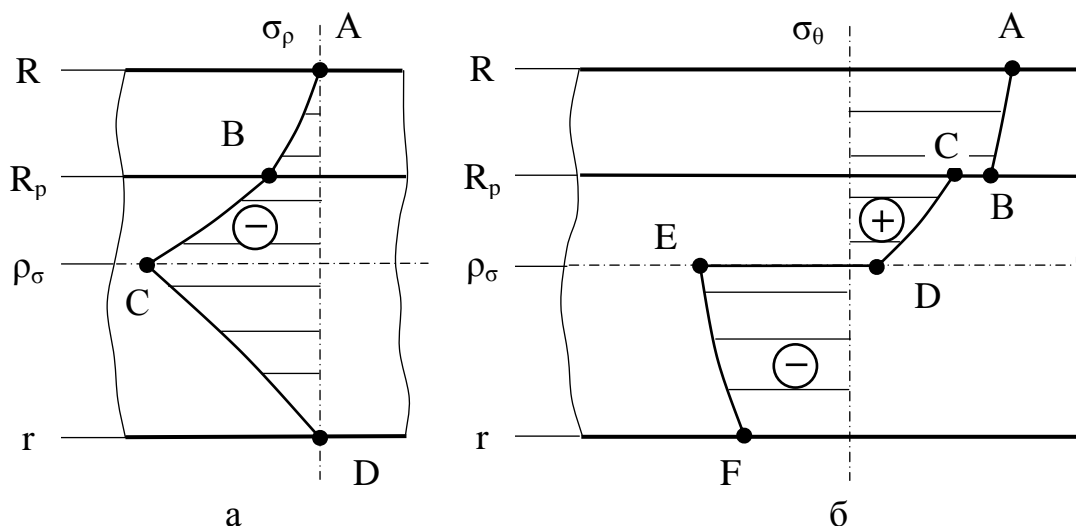


Рис. 2 – Эпоры распределения напряжений по толщине при гибке моментом двухслойного листа: а – радиальных, б – тангенциальных

В соответствии с этим построены эпоры распределения напряжений по толщине изгибаемого двухслойного листа (рис. 2), для следующих исходных

данных и допущений: отношение предела текучести металла плакирующего слоя к пределу текучести металла основного слоя (σ_{s1}/σ_s) составляет 1,4; плакирующий слой составляет 0,3 толщины двухслойного листа (характерно для листов двухслойной стали по ГОСТ 10885-85); нейтральный слой напряжений находится посередине толщины листа.

Выводы. 1. При изгибе двухслойного листа (полосы) плакирующим слоем наружу радиус нейтрального слоя напряжений ρ_σ зависит (формула (31)) от доли плакирующего слоя в двухслойном листе и от соотношения пределов текучести металлов основного и плакирующего слоев.

2. Знаки радиальных и тангенциальных напряжений в зонах растяжения и сжатия аналогичны знакам напряжений в соответствующих зонах для монометалла.

Список литературы: 1. Голованова А.П. Особенности обрабатываемости давлением двухслойных металлов / А.П. Голованова, Б.Н. Шевелкин // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1966. – № 4. – С. 39–42. 2. Сторожев М.В. Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с. 3. Загорянский В.Г. Расчетная методика оценки деформационной способности биметаллических полос по их предельному изгибу / В.Г. Загорянский // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. - Х.: НТУ „ХПІ”. - 2012 р. - № 46 (952) - 240 с. – С. 45-49. 4. Лысов М.И. Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки / М.И. Лысов. – М.: Машиностроение, 1966. – 236 с. 5. Зубцов М.Е. Листовая штамповка / М.Е. Зубцов. – Л.: Машиностроение, 1980. – 432 с. 6. Бронштейн И.Н. Справочник по математике (для инженеров и учащихся вузов) / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1981. – 720 с.

Поступила в редакцию 29.06.2014

ЗМІСТ

Горобець В. Н., Коворотный А. Л., Гончаренко Ю. В., Кивва Ф. В., Зотов С. М., Головка М. И., Себенко А. А., Колков Р. П.

Микроволновой датчик уровня бетонной смеси.....	3
Євстратов В. О., Левченко В. М., Кутецкий Я. В.	
Експериментальне дослідження кінематики процесів витягування і класифікація заготованок.....	10
Коренькова А. А., Плеснецов Ю. А.	
Анализ формоизменения отверстий при валковой формовке гнутых перфорированных профилей.....	18
Кухарь В. В.	
Определение направлений использования профилированных заготовок после подготовительной осадки штамповыми вставками различной конфигурации	25
Кухарь В. В., Лесовой М. О.	
Разработка математической модели первого этапа процесса разделения гнутых профилей и труб на мерные длины	33
Левченко В. Н., Галась И. В.	
Исследование процесса комбинированного выдавливания.....	40
Лобанов В. К., Пашкова Г. И.	
Технологические особенности штамповки с последующим обжимом.....	50
Подзолкова Ю. А., Плеснецов Ю. А.	
Теоретический анализ напряженно-деформированного состояния металла при валковой формовке упрочненных гнутых профилей.....	60
Себко В. В., Бабенко В. Н., Рябовол Е. Н.	
Определение коэффициента затухания магнитного поля в промышленной микроволновой камере	65
Сикульский В. Т.	
Формообразование панелей с продольным оребрением местной гибкой с посадкой (разводкой)	72
Стасевский С. Л., Степаненко А. Н., Узрюмов Ю. Д., Павловский Б. Г., Узрюмов Д. Ю.	
Направления модернизации оборудования трубопрокатного агрегата 5-12" с пилигримовыми станами ПАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ».....	80

Стрельчук Р. М.

Повышение эффективности процесса плоского шлифования на основе анализа влияния динамических факторов..... 94

Хомяк Ю. В.

Электроэрозионная установка для изготовления моделей дефектов..... 99

Фролов Е. А., Кравченко С. И., Носенко О. Г., Ясько С. Г.

Повышение степени вытяжки тонколистовых деталей при пневмударной штамповке жидкостью..... 105

Бородій Ю. П

Розробка технологій та устаткування для нанесення комбінованих зносостійких покриттів на деталі типу валу..... 111

Лотоус В. В., Наумова Е. А., Драгобецкий В. В.

Импульсное обжатие цилиндрической оболочки 119

Павленко В. Н.

Истирание и смятие, как два вида износа штампового инструмента 127

Андилахай А. А., Дитиненко С. А., Новиков Ф. В.

Влияние формы сопла на технологические параметры абразивной обработки деталей затопленными струями 134

Добров И. В., Семичев А. В., Новиков Б. О., Гетьман Е. В.

Новый способ аналогового моделирования кинематики процесса осадки..... 140

Новиков Ф. В., Брижан Т. М., Крюк А. Г., Кленов О. С.

Аналитическое определение и анализ параметров силовой напряженности процесса резания..... 149

Новиков Ф. В., Крюк А. Г., Рябенков И. А., Иванов И. Е.

Аналитическое определение амплитуды автоколебаний при точении / 156

Шкурупий В. Г., Дитиненко С. А.

Влияние технологических факторов на эффект процесса полирования металлов..... 162

Загорянский В. Г., Шаповал А. А., Мосьпан Д. В.

Анализ напряженного состояния при пластическом изгибе двухслойных листов плакирующим слоем наружу..... 170

РЕФЕРАТИ

УДК 681.586.621.37:543.275.1

Микроволнової датчик рівня бетонної суміші / Горобець В. Н., Коворотний Л. А., Гончаренко Ю. В., Кивва Ф. В., Зотов С. М., Головка М. И., Себенко А. А., Колков Р. П. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 3–10. – Бібліогр.: 5 назв.

В роботі представлений датчик для сигналізації граничних значень рівня бетонної суміші, який може бути використаний в загрузочних бункерах технологічних ліній для виготовлення бетонних виробів. Він має покращені показники, такі як чутливість, точність, механічна міцність в порівнянні з іншими датчиками, які використовуються в аналогічних технологічних процесах.

Ключові слова: сигналізатор рівня, бетонна суміш, мікрохвилі, резонанс.

УДК 621.73

Експериментальне дослідження кінематики процесів витягування і класифікація заготовок / Євстратов В. О., Левченко В. М., Кутецький Я. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 10–18. – Бібліогр.: 5 назв.

У статті наведені результати експериментального дослідження процесу витягування вісесиметричних деталей з пласкої заготовки. Описані оригінальні способи виявлення особливостей деформації заготовок трьох різних розмірів: «великої», «середньої» та «малої». Експериментальні дослідження підтвердили, що три схеми деформації, зазначені авторами в раніше опублікованих роботах, дійсно мають місце. Отримані експериментальні дані дозволяють обґрунтувати більш досконалу математичну модель процесу витягування і підійти до створення підсистеми САПР розроблення процесів витягування і конструювання робочого інструмента.

Ключові слова: витягування, пуансон, матриця, деформація, коефіцієнт витягування.

УДК 621.771.634

Анализ формоизменения отверстий при валковой формовке гнутых перфорированных профилей / Коренькова А. А., Плеснецов Ю. А. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 18–24. – Бібліогр.: 6 назв.

Дослідження показали, що деформованість круглих отворів збільшується із зростанням кутів підгинання, товщини металу, зменшенням ширини полиць, що підгинаються, і величини перемички між отворами. Величина відхилення в розмірах отворів у порівнянні з вихідними становить 0,07–1,08% у кутових профілів і 0,07–3,20% у швелерних. У роботі встановлено, що при формуванні перфорованих профілів по жорстких режимам відбувається багаторазове зростання деформування отворів.

Ключові слова: профілі перфоровані, формовка, валки, отвори, формозміну

УДК 621.73

Определение направлений использования профилированных заготовок после подготовительной осадки штамповыми вставками различной конфигурации / Кухарь В. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 25–32. – Бібліогр.: 24 назви.

Проаналізовано особливості формозміни заготовок при осаджуванні штамповими вставками з плоскою, випуклою і конічною геометрією робочої поверхні. Виконана систематизація і співставлення конфігурацій профільованих заготовок, одержаних способами осаджування, з базовою номенклатурою поковок, що штампують на пресовому устаткуванні. Визначено структурні складові технологій штампування типових виробів різної номенклатури на основі попереднього профілювання заготовок осаджуванням штамповими вставками різної геометрії.

Ключові слова: заготовка, профілювання, осаджування, формозміна, штампові вставки, об'ємне штампування, визначення номенклатури поковок.

УДК 621.983

Разработка математической модели первого этапа процесса разделения гнутых профилей и труб на мерные длины / Кухарь В. В., Лесовой М. О. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 33–39. – Бібліогр.: 8 назв.

Запропоновано новий спосіб безвідходного розділення гнутих профілів і труб на мірні довжини. На основі нанесення концентратора напружень і додаткових знакозмінних напружень з наступним скручуванням профілю, розроблено математичну модель напружено-деформованого стану металу на першому етапі формування надрезанного профілю.

Ключові слова: гнутий профіль, труба, безвідходний поділ, напружено-деформований стан, математична модель, листозгинальна машина.

УДК 621.77

Исследование процесса комбинированного выдавливания / Левченко В. Н., Галась И. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 40–50. – Бібліогр.: 2 назви.

Проведене числене моделювання процесу комбінованого видавлювання, додатково проведені розрахунки процесів прямого і зворотнього видавлювання. На підставі енергетичного методу розроблено математичну модель процесу комбінованого видавлювання, яка дозволяє визначити енергосилові параметри процесу як функції від основних параметрів. Розроблена математична модель реалізована в математичному пакеті SKYLAB і у вигляді програмного продукту (підсистеми САПР) у середовищі Visual Basic.

Ключові слова: видавлювання комбіноване, модель математична, параметри енергосилові.

УДК 621.7.073.004

Технологические особенности штамповки с последующим обжимом / Лобанов В. К., Пашкова Г. И. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 50–59. – Бібліогр.: 7 назв.

Викладені технологічні особливості процесу гарячого штампування з подальшим обтиском, конструкції та матеріали робочих частин штампового оснащення, розроблений класифікатор поковок, рекомендованих для штампування з подальшим обтиском. Встановлено, що штамповка з подальшим обтиском характеризується підвищеними показниками ефективності використання металу і якості матеріалу поковок, рекомендується для широкого застосування при виробництві запропонованих груп поковок.

Ключові слова: гаряче штампування, обтиск, матриця, неконтактна деформація

УДК 621.771.63

Теоретический анализ напряженно-деформированного состояния металла при валковой формовке упрочненных гнутых профилей / Подзолкова Ю. А., Плеснецов Ю. А. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 60-65. Бібліогр.: 11 назв.

З використанням методу опору матеріалів пластичної деформації визначено напружено-деформований стан металу при формуванні рифлень на елементах зміцнених профілів і профілів з поверхнею протиковзання. З використанням принципу енергетичної рівноваги роботи деформування і жорсткості кліти отримано аналітичні залежності для визначення енергосилових параметрів процесу формування елементів поверхні протиковзання і рифлень. Мінімізацією функціоналу повної потенційної енергії вирішена задача знаходження фактичної висоти рифлень та їх опади.

Ключові слова: стан напружено-деформований, енергосилові параметри, рифлення, фактична висота, осад.

УДК 006.015.5

Определение коэффициента затухания магнитного поля в промышленной микроволновой камере / Себко В. В., Бабенко В. Н., Рябовол Е. Н. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 65-72. Бібліогр.: 12 назв.

Запропонований алгоритм спільного вимірювального контролю коефіцієнта загасання h_r , відносної магнітної проникності μ_r , питомої електричної провідності σ_t і температури t стінки мікрохвильової камери за допомогою екранного вихретокового пристрою. Запропонований чотирихпараметровий вихрострумний метод вимірювального контролю відносної магнітної проникності, питомої електричної провідності, температури і коефіцієнта загасання однорідного магнітного поля у стінці мікрохвильової камери. Наведені основні співвідношення, що описують чотирихпараметровий екранний метод.

Ключові слова: мікрохвильова камера, алгоритм сумісного вимірювального контролю, вихрострумний пристрій.

УДК 621.981.06

Формообразование панелей с продольным оребрением местной гибкой с посадкой (разводкой) / Сиккульский В. Т. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 72-79. Бібліогр.: 3 назви.

Наведено опис нового процесу отримання панелей складних форм місцевим деформуванням з використанням оригінального пристрою, в якому реалізується місцевий вигин ребра з спільною деформацією посадки і разводки. На прикладі отримання панелей подвійної кривизни наведені порівняльні характеристики процесу посадки і разводки. Наведено інженерну методику розрахунку розподілу локальних впливів, описані результати випробування процесу на зразках з алюмінієвих сплавів і наведені основні технологічні рекомендації.

Ключові слова: формоутворення, посадка, разводка, вигин, доведення форми, подвійна кривизна.

УДК 621.774.3

Направления модернизации оборудования трубопрокатного агрегата 5-12" с пилгримовыми станами ПАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ» / Стасевский С. Л., Степаненко А. Н., Угрюмов Ю. Д., Павловский Б. Г., Угрюмов Д. Ю. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 80-94. Бібліогр.: 2 назви.

Розглянуті питання проведення модернізації та реконструкції пілігримового агрегату 5-12" ПАТ «Інтерпайп НТЗ». Модернізація та реконструкція ТПА 5-12" дозволить значно продовжити термін служби агрегату і поліпшити його техніко-економічні показники. Впровадження технології та обладнання для підготовки передніх кінців гільз є найважливішим перспективним заходом, що забезпечує приріст обсягу виробництва ~ 12 тис. тон труб на рік. В результаті поетапного впровадження заходів на ТПА 5-12" приріст виробництва складе 60-70 тис. тон труб на рік.

Ключові слова: труба, пілігримовий агрегат, модернізація, реконструкція.

УДК 621.923

Повышение эффективности процесса плоского шлифования на основе анализа влияния динамических факторов / Стрельчук Р. М. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 94-99. Бібліогр.: 2 назви.

При обробці деталей на шліфувальних верстатах часто виникають коливання, які погіршують роботу верстатів, знижують точність, збільшують шорсткість і хвилястість обробленої поверхні, що призводить до збільшення зносу інструменту. Виходячи з цього, запропоновано розрахунково-експериментальний метод визначення меж області стійкої роботи шліфувальних верстатів.

Ключові слова: процес шліфування, глибина і ширина зрізаного шару, швидкість різання, розрахункова продуктивність верстата.

УДК 621.9.048.4, 620.179.14

Электроэрозионная установка для изготовления моделей дефектов / Хомяк Ю. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 99-105. Бібліогр.: 13 назв.

Проведено аналіз поширених методів і засобів електроерозійної металообробки. Вивчено їх особливості для виготовлення моделей дефектів для досліджень вихорострумівих засобів контролю. Розроблена і виготовлена установка для виготовлення штучних дефектів металевих зразків. Описано роботу електронної схеми генератора імпульсів, встановлено, що прийнятний режим обробки, при якому процес електроерозії протікає стійко при тривалості імпульсів - 1,5-3 мкс, частоті проходження - 20-40 кГц, амплітуді - 200 В.

Ключові слова: вихорострумівий дефектоскопія, штучний дефект, електроерозійна обробка, перетворювач, імпульс, транзистор.

УДК 621.919:621.7.044

Повышение степени вытяжки тонколистовых деталей при пневмударной штамповке жидкостью / Фролов Е. А., Кравченко С. И., Носенко О. Г., Ясько С. Г. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 105-111. Бібліогр.: 4 назви.

Розглянуто, а також аналітично й експериментально досліджено шляхи підвищення ступеня витяжки тонколистових деталей методом пневмударного штампування рідиною. Отримано залежності, які дозволяють проектувати технологічний процес високошвидкісного штампування тонкостінних деталей за рахунок штучного регулювання величин протяжних ребер формуютьуючих матриць на пневмударному обладнанні моделі Т1324 штампування рідиною.

Ключові слова: високошвидкісне витягування, ступінь витяжки, пневмударне штампування рідиною, тонколистові деталі, технологічний процес.

УДК 621.979

Розробка технологій та устаткування для нанесення комбінованих зносостійких покриттів на деталі типу валу / Бородій Ю. П. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 111–119. Бібліогр.: 4 назви.

Стаття присвячена розробці технологій поверхневого зміцнення деталей машин типу валів шляхом створення комбінованих багатошарових зносостійких покриттів з заданими властивостями. Отримані результати представляють практичний інтерес для технологічних розробок, що забезпечують формування покриттів з необхідними експлуатаційними властивостями для різних умов роботи деталей машин, а також інформацію про можливість зміни властивостей покриттів. Нанесення електроіскрових покриттів збільшує експлуатаційну стійкість деталей машин в 3-6 разів.

Ключові слова: поверхневе зміцнення, деталі машин, електроіскрове легування, поверхневе пластичне деформування, зносостійкі покриття.

УДК 534.2+539.14.01

Импульсное обжатие цилиндрической оболочки / Лотоус В. В., Наумова Е. А., Драгобецкий В. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 119–127. Бібліогр.: 6 назв.

У статті наведено опис технологій заснованих на дії кумулятивних зарядів вибухової речовини на оброблюваний матеріал. Розглянуті питання використання енергії вибуху для розпаду й синтезу хімічних елементів у кумулятивному струмені. Наведено якісний опис процесу обтиснення циліндричної оболонки кумулятивним зарядом вибухової речовини. Оболонки, що утворюються при обтисненні, гофри стають джерелами системи кумулятивних струменів. Дослідження дозволили

розробити нові технології вибухового зміцнення й легування й метод фізичного моделювання обтиснення грузлих матеріалів.

Ключові слова: вибухові технології, кумуляція, плазма, хімічні елементи, вибухові речовини, гороутворення.

УДК 621.983.321

Истирание и смятие, как два вида износа штампового инструмента / Павленко В. Н. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 127–134. Бібліогр.: 6 назв.

Стаття присвячена результатам дослідження розподілу ступеня деформацій по об'єму поковок, що деформуються методом координатної сітки. Встановлено, що найбільш інтенсивно елементи штампа спотворюються в початковий період. Визначено, що стирання та зминання є основним видом зносу штампового інструменту.

Ключові слова: високошвидкісне об'ємне деформування, поковка, деформація, зминання, стирання, штамп.

УДК 621.92.001.5

Влияние формы сопла на технологические параметры абразивной обработки деталей затопленными струями / Андилахай А. А., Дитиненко С. А., Новиков Ф. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 134–139. Бібліогр.: 5 назв.

Наведені результати експериментальних досліджень по встановленню найбільш ефективної конфігурації сопла за критерієм забезпечення максимальної кількості абразивних зерен, інжектруємих в струмінь що витікає в абразивну суспензію, на основі визначення кількості слідів зерен на оброблених полірованих латунних пластинах-екранах. Показано, що найбільш щільне розташування слідів абразивних зерен забезпечується при використанні надзвукового сопла Лавалю. Отже, застосування надзвукового сопла Лавалю забезпечує подвійний ефект обробки: збільшення швидкості потоку і збільшення кількості абразивних зерен, інжектруємих у затоплений струмінь стисненого повітря.

Ключові слова: абразивна обробка, абразивні зерна, надзвукове сопло Лавалю, стиснене повітря, латунь, час обробки, профілограма.

УДК 621.771

Новый способ аналогового моделирования кинематики процесса осадки / Добров И. В., Семичев А. В., Новиков Б. О., Гетьман Е. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 140–149. Бібліогр.: 7 назв.

Розроблено метод аналогового моделювання кінематики процесу опаді симетричною заготовки плоским пуансоном з використанням пружини стиснення в умовах її пружно-пластичної деформації. Встановлено взаємозв'язок характеру зміни швидкості деформації заготовки при осаді із зміною кроку витків пружини при її динамічному навантаженні. З використанням сучасних засобів цифрового кінозйомки і персональних комп'ютерів при аналізі деформації витків пружини стиснення встановлено характер зміни швидкості деформації елементів заготовки по її висоті. Отримані розрахункові значення величин швидкостей деформації заготовки якісно відповідають результатам натурного експерименту при осаді циліндричної заготовки у виробничих умовах.

Ключові слова: аналогове моделювання, осадження, пружина стиснення, пружна, пластична деформація, швидкість деформації.

УДК 621.923

Аналитическое определение и анализ параметров силовой напряженности процесса резания / Новиков Ф. В., Брижан Т. М., Крюк А. Г., Кленов О. С. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 149–155. Бібліогр.: 6 назв.

У статті запропоновано математичну модель механіки процесу різання та приведені аналітичні залежності для визначення основних параметрів силової напруженості процесу різання, включаючи силу різання, енергоємність обробки, коефіцієнт усадки стружки. Теоретично показано, що основним шляхом їх зменшення є поліпшення умов стружкообформування за рахунок зменшення радіальної складової сили різання, використовуючи різні способи дроблення стружки, знижуючи коефіцієнт тертя оброблюваного та інструментального матеріалів, змінюючи кут сходу стружки з передньої поверхні різця і т.д.

Ключові слова: механічна обробка, інструмент, оброблюваний матеріал, сила різання, енергоємність обробки, коефіцієнт усадки стружки, продуктивність обробки.

УДК 621.923

Аналитическое определение амплитуды автоколебаний при точении / Новиков Ф. В., Крюк А. Г., Рябенков И. А., Иванов И. Е. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 156–161. Бібліогр.: 6 назв.

В работе приведено аналитическое решение определения амплитуды автоколебаний, возбуждаемых при точении в результате трения задней поверхности инструмента с обрабатываемым материалом в связи с падающей характеристикой силы резания – трения от скорости резания. Теоретически обоснованы условия возникновения колебаний при точении и определены пути их устранения. Показано, что уменьшить амплитуду колебаний можно за счет существенного увеличения скорости резания, увеличения переднего угла резца и уменьшения площадки износа на его задней поверхности, применяя для этого, например, алмазные резцы.

Ключевые слова: точение, инструмент, автоколебания, амплитуда колебаний, сила резания, скорость резания, подача, площадка износа.

УДК 621.923

Влияние технологических факторов на эффект процесса полирования металлов. / Шкурупий В. Г., Дитиненко С. А. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 162–170. Бібліогр.: 9 назв.

Сформулированы основные условия уменьшения шероховатости поверхности при абразивном полировании. Показано, что эффективность полирования повышается с увеличением окружной скорости полировальника до 30 м/с (и выше) при одновременном снижении зернистости абразива. Установлено, что наличие в крупнозернистой доли фракции отдельных крупных зерен снижает качество обработанной поверхности (шероховатость) в силу наличия глубоких царапин. Для уменьшения времени обработки необходимо, чтобы зернистость абразива при полировании не превышала максимальную высоту микронеровностей исходной поверхности.

Ключевые слова: абразивная обработка, полирование, абразив, зернистость, скорость полировальника, обрабатываемая деталь, шероховатость поверхности.

УДК 621.981:669.14

Анализ напряженного состояния при пластическом изгибе двухслойных листов плакирующим слоем наружу / Загорянский В. Г., Шаповал А. А., Мосьпан Д. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 170–177. Бібліогр.: 6 назв.

У статті, на основі аналізу напруженого стану двошарових листів при пластичному вигині плакуючим шаром назовні, розроблена математична модель, як дозволяє визначити розподіл напруги по товщині листа. На основі отриманих залежностей визначається радіус кривизни нейтральної поверхні напруги, необхідний для визначення моменту, що вигинає, і граничних і допустимих радіусів гнуття двошарових листового листів. Отримані залежності дозволяють визначити положення нейтрального шару в двошарових листах, виготовлених з будь-яких металів.

Ключові слова: пластичний вигін, двошаровий лист, розподіл напружень, нейтральна поверхня напружень, радіус кривизни.

РЕФЕРАТЫ

УДК 681.586.621.37:543.275.1

Микроволновой датчик уровня бетонной смеси / Горобец В. Н., Коворотный Л. А., Гончаренко Ю. В., Кивва Ф. В., Зотов С. М., Головкин М. И., Семенов А. А., Колков Р. П. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 3–10. – Бібліогр.: 5 назв.

В работе представлен датчик для сигнализации предельных значений уровня бетонной смеси, который может быть использован в загрузочных бункерах технологических линий по изготовлению бетонных изделий. Он обладает улучшенными показателями, такими как чувствительность, точность, механическая прочность по сравнению с другими датчиками, используемыми в аналогичных технологических процессах.

Ключевые слова: сигнализатор уровня, бетонная смесь, микроволны, резонанс.

УДК 621.73

Экспериментальное исследование кинематики процессов вытягивания и классификация заготовок / Евстратов В. А., Левченко В. Н., Кутецкий Я. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 10–18. – Бібліогр.: 5 назв.

В статье приведены результаты экспериментального исследования процесса вытягивания осесимметричных деталей из плоской заготовки. Описаны оригинальные способы выявления особенностей деформации заготовок трех разных размеров: «большой», «средней» и «малой». Экспериментальные исследования подтвердили, что три схемы деформации, указанные авторами в ранее опубликованных работах, действительно имеют место. Полученные экспериментальные данные позволяют обосновать более совершенную математическую модель процесса вытягивания и подойти к созданию подсистемы САПР разработки процессов вытяжки и конструирования рабочего инструмента.

Ключевые слова: вытягивание, пуансон, матрица, деформация, коэффициент вытяжки.

УДК 621.771.634

Анализ формоизменения отверстий при валковой формовке гнутых перфорированных профилей / Коренькова А. А., Плещенцов Ю. А. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 18–24. – Бібліогр.: 6 назв.

Исследования показали, что деформируемость круглых отверстий увеличивается с возрастанием углов подгибки, толщины металла, уменьшением ширины подгибаемых полок и величины перемычки между отверстиями. Величина отклонения в размерах отверстий по сравнению с исходными составляет 0,07–1,08% у уголкового профиля и 0,07–3,20% у швеллерных. В работе установлено, что при формовке перфорированных профилей по жестким режимам происходит многократное возрастание деформирования отверстий.

Ключевые слова: профили перфорированные, формовка, валки, отверстия, формоизменение.

УДК 621.73

Определение направлений использования профилированных заготовок после подготовительной осадки штамповыми вставками различной конфигурации / Кухарь В.В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 25–32. – Бібліогр.: 24 назви.

Проанализированы особенности формоизменения заготовок при осадке штамповыми вставками с плоской, выпуклой и конической геометрией рабочей поверхности. Выполнена систематизация и сопоставление конфигураций профилированных заготовок, полученных способами осадки, с базовой номенклатурой поковок, штампуемых на прессовом оборудовании. Определены структурные составляющие технологий штамповки типовых изделий различной номенклатуры на основе предварительного профилирования заготовок осадкой штамповыми вставками различной геометрии.

Ключевые слова: заготовка, профилирование, осадка, формоизменение, штамповые вставки, объемная штамповка, определение номенклатуры поковок.

УДК 621.983

Разработка математической модели первого этапа процесса разделения гнутых профилей и труб на мерные длины / Кухарь В. В., Лесовой М. О. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 33–39. – Бібліогр.: 8 назв.

Предложен новый способ безотходного разделения гнутых движущихся профилей и труб на мерные длины без участия уникального дорогостоящего оборудования, позволяющий осуществлять резку мерных заготовок без останковки стана. Разработана математическая модель напряженно-деформированного состояния металла на первом этапе формовки надрезанного профиля, основанная на выделении элементарного поперечного сечения листа, а затем численном решении конечно-разностной формы условия статического равновесия для него. После нанесения концентратора напряжений и приложения знакопеременных напряжений в процессе формовки с последующим скручиванием профиля в косовалковой правильной клетки, обеспечивается гарантированное отделение мерной заготовки.

Ключевые слова: гнутый профиль, труба, безотходное разделение, напряженно-деформированное состояние, математическая модель, листогибочная машина.

УДК 621.77

Исследование процесса комбинированного выдавливания / Левченко В. Н., Галась И. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 40–50. – Бібліогр.: 2 назви.

Проведено численное моделирование процесса комбинированного выдавливания, дополнительно проведены расчеты процессов прямого и обратного выдавливания. На основе энергетического метода разработана математическая модель процесса комбинированного выдавливания, позволяющая определить энергосиловые параметры процесса, как функции от основных параметров. Разработанная математическая модель реализована в математическом пакете SKYLAB и в виде программного продукта (подсистемы САПР) в среде Visual Basic.

Ключевые слова: выдавливание комбинированное, модель математическая, параметры энергосиловые.

УДК 621.7.073.004

Технологические особенности штамповки с последующим обжимом / Лобанов В. К., Пашкова Г. И. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 50–59. – Бібліогр.: 7 назв.

Изложены технологические особенности процесса горячей штамповки с последующим обжимом, конструкции и материалы рабочих частей штамповой оснастки, разработан классификатор поковок, рекомендуемых для штамповки с последующим обжимом. Установлено, что штамповка с последующим обжимом, характеризующаяся повышенными показателями эффективности использования металла и качества материала поковок, рекомендуется для широкого применения при производстве предложенных групп поковок.

Ключевые слова: горячая штамповка, обжим, матрица, внеконтактная деформация.

УДК 621.771.63

Теоретический анализ напряженно-деформированного состояния металла при валковой формовке упрочненных гнутых профилей / Подзолкова Ю. А., Плеснецов Ю. А. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 60–65. Бібліогр.: 11 назв.

С использованием метода сопротивления материалов пластическому деформированию определено напряженно-деформированное состояние металла при формовке рифлений на элементах

упрочненных профилей и профилей с поверхностью противоскольжения. С использованием принципа энергетического равновесия работы деформирования и жесткости клетки получены аналитические зависимости для определения энергосиловых параметров процесса формовки элементов поверхности противоскольжения и рифлений. Минимизацией функционала полной потенциальной энергии решена задача нахождения фактической высоты рифлений и их осадки.

Ключевые слова: состояние напряженно-деформированное, энергосиловые параметры, рифления, фактическая высота, осадка.

УДК 006.015.5

Определение коэффициента затухания магнитного поля в промышленной микроволновой камере / Себко В. В., Бабенко В. Н., Рябовол Е. Н. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 65–72. Бібліогр.: 12 назв.

Предложен алгоритм совместного измерительного контроля коэффициента затухания h_r , относительной магнитной проницаемости μ_{rn} , удельной электрической проводимости σ_t и температуры t стенки микроволновой камеры с помощью экранного вихретокового устройства. Предложен четырехпараметровый вихретоковый метод измерительного контроля относительной магнитной проницаемости, удельной электрической проводимости, температуры и коэффициента затухания однородного магнитного поля в стенке микроволновой камеры. Приведены основные соотношения, описывающие четырехпараметровый экранный метод.

Ключевые слова: микроволновая камера, алгоритм совместного измерительного контроля, вихретоковое устройство.

УДК 621.981.06

Формообразование панелей с продольным оребрением местной гибкой с посадкой (разводкой) / Сиккульский В. Т. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 72–79. Бібліогр.: 3 назви.

Приведено описание нового процесса получения панелей сложных форм местным деформированием с использованием оригинального устройства, в котором реализуется местный изгиб ребра с совместной деформацией посадки и разводки. На примере получения панелей двойной кривизны приведены сравнительные характеристики процесса посадки и разводки. Приведена инженерная методика расчета распределения локальных воздействий, описаны результаты испытания процесса на образцах из алюминиевых сплавов и приведены основные технологические рекомендации.

Ключевые слова: формообразование, посадка, разводка, изгиб, доводка формы, двойная кривизна.

УДК 621.774.3

Направления модернизации оборудования трубопрокатного агрегата 5-12" с пилигримовыми станами ПАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ» / Стасевский С. Л., Степаненко А. Н., Угрюмов Ю. Д., Павловский Б. Г., Угрюмов Д. Ю. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 80–94. Бібліогр.: 2 назви.

Рассмотрены вопросы проведения модернизации и реконструкции пилигримового агрегата 5-12" ПАО «Интерпайп НТЗ». Модернизация и реконструкция ТПА 5-12" позволит значительно продлить срок службы агрегата и улучшить его технико-экономические показатели. Внедрение технологии и оборудования для подготовки передних концов гильз является важнейшим перспективным мероприятием, обеспечивающим прирост объема производства ~ 12 тыс. тонн труб в год. В результате поэтапного внедрения мероприятий на ТПА 5-12" прирост производства составит 60-70 тыс. тонн труб в год.

Ключевые слова: труба, пилигримовый агрегат, модернизация, реконструкция.

УДК 621.923

Повышение эффективности процесса плоского шлифования на основе анализа влияния динамических факторов / Стрельчук Р. М. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 94–99. Бібліогр.: 2 назви.

При обработке деталей на шлифовальных станках часто возникают колебания, которые ухудшают работу станков, снижают точность, увеличивают шероховатость и волнистость обработанной поверхности, что приводит к увеличению износа инструмента. Исходя из этого, предложен расчетно-экспериментальный метод определения границ области устойчивой работы шлифовальных станков. В работе установлено, что высокоскоростное шлифование сталей и сплавов кругами из эльбора и электрокорунда можно рассматривать главным образом как средство повышения производительности обработки.

Ключевые слова: процесс шлифования, глубина и ширина срезаемого слоя, скорость резания, расчетная производительность станка.

УДК 621.9.048.4, 620.179.14

Электроэрозионная установка для изготовления моделей дефектов / Хомяк Ю. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 99–105. Бібліогр.: 13 назв.

Проведен анализ распространенных методов и средств электроэрозионной металлообработки. Изучены их особенности для изготовления моделей дефектов для исследований вихрековых средств контроля. Разработана и изготовлена установка для изготовления искусственных дефектов металлических образцов. Описана работа электронной схемы генератора импульсов, установлено, что приемлемый режим обработки, при котором процесс электроэрозии протекает устойчиво при длительности импульсов – 1,5-3 мкс, частоте следования – 20-40 кГц, амплитуде – 200 В.

Ключевые слова: вихрековая дефектоскопия, искусственный дефект, электроэрозионная обработка, преобразователь, импульс, транзистор.

УДК 621.919:621.7.044

Повышение степени вытяжки тонколистовых деталей при пневмоударной штамповке жидкостью / Фролов Е. А., Кравченко С. И., Носенко О. Г., Ясько С. Г. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 105–111. Бібліогр.: 4 назви.

Рассмотрены, а также аналитически и экспериментально исследованы пути повышения степени вытяжки тонколистовых деталей методом пневмоударной штамповки жидкостью. Получены зависимости, позволяющие проектировать технологический процесс высокоскоростной штамповки тонкостенных деталей за счет искусственного регулирования величин протяжных ребер формообразующих матриц на пневмоударном оборудовании модели Т1324 штамповки жидкостью.

Ключевые слова: высокоскоростная вытяжка, степень вытяжки, пневмоударная штамповка жидкостью, тонколистовые детали, технологический процесс.

УДК 621.979

Разработка технологий и оборудования для нанесения комбинированных износостойких покрытий на детали типа вала / Бородий Ю. П. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 111–119. Бібліогр.: 4 назви.

Статья посвящена разработке технологий поверхностного упрочнения деталей машин типа вала путем создания комбинированных многослойных износостойких покрытий с заданными свойствами. Полученные результаты представляют практический интерес для технологических разработок, которые обеспечивают формирование покрытий с необходимыми эксплуатационными свойствами для разных условий работы деталей машин, а также информацию о возможности изменения свойств покрытий. Нанесение электроискровых покрытий увеличивает эксплуатационную стойкость деталей машин в 3-6 раз.

Ключевые слова: поверхностное упрочнение, детали машин, электроискровое легирование, поверхностное пластическое деформирование, износостойкие покрытия.

УДК 534.2+539.14.01

Импульсное обжатие цилиндрической оболочки / Лотоус В. В., Наумова Е. А., Драгобецкий В. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 119–127. Бібліогр.: 6 назв.

В статье приведено описание технологий основанных на действии кумулятивных зарядов взрывчатого вещества на обрабатываемый материал. Рассмотрены вопросы использования энергии взрыва для распада и синтеза химических элементов в кумулятивной струе. Приведено качественное описание процесса обжатия цилиндрической оболочки кумулятивным зарядом взрывчатого вещества. Образующиеся при обжатии оболочки гофры становятся источниками системы кумулятивных струй. Исследования позволили разработать новые технологии взрывного упрочнения и легирования и метод физического моделирования обжатия вязких материалов.

Ключевые слова: взрывные технологии, кумуляция, плазма, химические элементы, взрывчатые вещества, гофрообразование.

УДК 621.983.321

Истирание и смятие, как два вида износа штампового инструмента / Павленко В. Н. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 127–134. Бібліогр.: 6 назв.

Статья посвящена результатам исследования распределения степени деформаций по объему деформируемых поковок методом координатной сетки. Установлено, что наиболее интенсивно элементы штампа искажаются в начальный период. Определено, что истирание и смятие являются основным видом износа штампового инструмента. Исследования показали о крайне неравномерное распределении деформаций по штампу, вследствие чего высокая неравномерность деформации снижает стойкость штампа.

Ключевые слова: высокоскоростное объемное деформирование, поковка, деформация, смятие, истирание, штамп.

УДК 621.92.001.5

Влияние формы сопла на технологические параметры абразивной обработки деталей затопленными струями / Андилахай А. А., Дитиненко С. А., Новиков Ф. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 134–139. Бібліогр.: 5 назв.

Приведены результаты экспериментальных исследований по установлению наиболее эффективной конфигурации сопла по критерию обеспечения максимального количества абразивных зерен, инжектируемых в струю, истекающую в абразивную суспензию, на основе определения количества следов зерен на обработанных полированных латунных пластинах-экранах. Показано, что наиболее плотное расположение следов абразивных зерен обеспечивается при использовании сверхзвукового сопла Лавалья. Следовательно, применение сверхзвукового сопла Лавалья обеспечивает двойной эффект обработки: увеличение скорости потока и увеличение количества абразивных зерен, инжектируемых в затопленную струю сжатого воздуха.

Ключевые слова: абразивная обработка, абразивные зерна, сверхзвуковое сопло Лавалья, сжатый воздух, латунь, время обработки, профилограмма.

УДК 621.771

Новый способ аналогового моделирования кинематики процесса осадки / Добров И. В., Семичев А. В., Новиков Б. О., Гетьман Е. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 140–149. Бібліогр.: 7 назв.

Разработан метод аналогового моделирования кинематики процесса осадки симметричной заготовки плоским пуансоном с использованием пружины сжатия в условиях ее упруго-пластической

деформации. Установлена взаимосвязь характера изменения скорости деформации заготовки при осадке с изменением шага витков пружины при ее динамическом нагружении. С использованием современных средств цифровой киносъемки и персональных компьютеров при анализе деформации витков пружины сжатия установлен характер изменения скорости деформации элементов заготовки по ее высоте. Полученные расчетные значения величин скоростей деформации заготовки качественно соответствуют результатам натурального эксперимента при осадке цилиндрической заготовки в производственных условиях.

Ключевые слова: аналоговое моделирование, осадка, пружина сжатия, упругая, пластическая деформация, скорость деформации.

УДК 621.923

Аналитическое определение и анализ параметров силовой напряженности процесса резания / Новиков Ф. В., Брижан Т. М., Крюк А. Г., Кленов О. С. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 149–155. Бібліогр.: 6 назв.

В статье предложена математическая модель механики процесса резания и приведены аналитические зависимости для определения основных параметров силовой напряженности процесса резания, включая силу резания, энергоемкость обработки, коэффициент усадки стружки. Теоретически показано, что основным путем их уменьшения является улучшение условий стружкообразования за счет уменьшения радиальной составляющей силы резания, используя различные способы дробления стружки, снижая коэффициент трения обрабатываемого и инструментального материалов, изменяя угол схода стружки с передней поверхности резца и т.д.

Ключевые слова: механическая обработка, инструмент, обрабатываемый материал, сила резания, энергоемкость обработки, коэффициент усадки стружки, производительность обработки.

УДК 621.923

Аналитическое определение амплитуды автоколебаний при точении / Новиков Ф. В., Крюк А. Г., Рябенков И. А., Иванов И. Е. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 156–161. Бібліогр.: 6 назв.

В работе приведено аналитическое решение определения амплитуды автоколебаний, возбуждаемых при точении в результате трения задней поверхности инструмента с обрабатываемым материалом в связи с падающей характеристикой силы резания – трения от скорости резания. Теоретически обоснованы условия возникновения колебаний при точении и определены пути их устранения. Показано, что уменьшить амплитуду колебаний можно за счет существенного увеличения скорости резания, увеличения переднего угла резца и уменьшения площадки износа на его задней поверхности, применяя для этого, например, алмазные резцы.

Ключевые слова: точение, инструмент, автоколебания, амплитуда колебаний, сила резания, скорость резания, подача, площадка износа

УДК 621.923

Влияние технологических факторов на эффект процесса полирования металлов. / Шкурупий В. Г., Дитиненко С. А. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 162–170. Бібліогр.: 9 назв.

Сформулированы основные условия уменьшения шероховатости поверхности при абразивном полировании. Показано, что эффективность полирования повышается с увеличением окружной скорости полировальника до 30 м/с (и выше) при одновременном снижении зернистости абразива. Установлено, что наличие в крупнозернистой доли фракции отдельных крупных зерен снижает качество обработанной поверхности (шероховатость) в силу наличия глубоких царапин. Для уменьшения времени обработки необходимо, чтобы зернистость абразива при полировании не превышала максимальную высоту микронеровностей исходной поверхности.

Ключевые слова: абразивная обработка, полирование, абразив, зернистость, скорость полировальника, обрабатываемая деталь, шероховатость поверхности.

УДК 621.981:669.14

Анализ напряженного состояния при пластическом изгибе двухслойных листов плакирующим слоем наружу / Загорянский В. Г., Шаповал А. А., Мосьпан Д. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 5 (1048). – С. 170–177. Библиогр.: 6 назв.

В статье, на основе анализа напряженного состояния двухслойных листов при пластическом изгибе плакирующим слоем наружу, разработана математическая модель, позволяющая определить распределение напряжений по толщине листа. На основе полученных зависимостей определяется радиус кривизны нейтральной поверхности напряжений, необходимый для определения изгибающего момента и предельных и допустимых радиусов гибки двухслойных листов. Полученные зависимости позволяют определять положение нейтрального слоя в двухслойных листах, изготовленных из любых металлов.

Ключевые слова: пластический изгиб, двухслойный лист, распределение напряжений, нейтральная поверхность напряжений, радиус кривизны.

ABSTRACTS

Microwave level gauge for concrete mixture / Gorobets V. N., Kovorotny L. A., Goncharenko Yu. V., Kivva F. V., Zotov S. M., Golovko M. I., Sevenko A. A., Kolkov R. P. // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 5 (1048). – P. 3–10. – Bibliogr.: 5.

The microwave sensor for indication of critical levels of concrete mixtures is presented. This sensor can be used in industrial batch hoppers and has improved technical characteristics such as: sensitivity, accuracy and mechanical durability comparatively to other similar sensors.

Keywords: level gauge, microwaves, resonant.

The experimental researches of drawing processes kinematics and classification of blanks / Evstratov V.A., Levchenko V.N., Kutetskiy Y.V. // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 5 (1048). – P. 10–18. – Bibliogr.: 5.

The article presents the results of an experimental study of the drawing process of axisymmetric parts of the slab. It describes how to identify features of the original strain blanks in three different sizes: «large», «medium» and «low». Experimental studies have confirmed that three deformation schemes specified by the authors in earlier papers, actually take place. Experimental data allows us to prove an ideal mathematical model of the drawing process and to approach the creation of drawing process working tool development and design CAD subsystem.

Keywords: drawing, punch, die, deformation, draw coefficient.

Analysis of hole forming for roll forming of perforated profiles / Koren'kova A.A., Plesnetsov Yu.A. // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 5 (1048). – P. 18–24. – Bibliogr.: 6.

Studies have shown that circular holes formability increases with increasing of bending angles, metal thickness, decreasing of the bent shelves width and magnitude of the bridges between the holes. The magnitude of sizes variance of holes varies from baseline up to 0,07-1,08% for angled profiles and 0,07-3,20% for U-sections. It is found in the paper that by forming of perforated profiles by hard modes causes significant increase in holes deformation.

Keywords: perforated profiles, forming, rolls, holes forming.

Defining the usage direction of profiled blanks after preparative draft with sinterchangeable stamping equipment of different configurations / Kukhar' V.V. // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 5 (1048). – P. 25–32. – Bibliogr.: 24.

Specifics of form changing of work-pieces during upsetting by die-plates with flat, convex and conical geometry of work surface are analysed. The systematisation and comparable analyze of form of shaped billets

worked by upsetting with based nomenclature of forging-parts worked by press equipment were executed. Structures steps of technique of impression die-forging for receiving types of different nomenclatures worked parts are determinate on the base of preparing profiling of work-pieces by upsetting on die-plates with different configuration.

Keywords: billet, profiling, upsetting, form changing, die-plates, volumetric impression die-forging, determination of nomenclatures of forging-parts.

Mathematical model development of the first step tubes and profiles separation on specific lengths / Kukhar V. V., Lesovoy M. O. // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 5 (1048). – P. 33–39. – Bibliogr.: 8.

A new method for the separation of non-waste moving curved profiles and tubes to length without unique expensive equipment that allows for cutting dimensional workpieces without stopping the mill. A mathematical model of the stress-strain state of the metal in the first phase forming notched profile based on allocation of elementary cross-section of the sheet, and then the numerical solution of finite-difference form of static equilibrium conditions for it. After applying a stress concentrator and application of alternating stresses in the molding process followed by twisting profile kosovalkovoy correct stand, providing guaranteed separation dimensional workpiece.

Keywords: bended profile, pipe, non-waste, separation, the stress-strain state, mathematical model, bending machine.

The investigation of combined extrusion process / Levchenko V. N., Galas I. V. // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 5 (1048). – P. 40–50. – Bibliogr.: 2.

Numerical simulation of the combined extrusion processes is performed, also calculated the forward and reverse extrusion. On the basis of the energy method, a mathematical model of combined extrusion, allowing to determine the energy-power parameters of the process, as a function of various parameters, is defined. The mathematical model is implemented in the mathematical package SKYLAB and as a software product (subsystem CAD) within Visual Basic environment.

Keywords: combined squeezing, mathematical model, energy-power parameters.

Technological features of stamping followed by crimp / Lobanov V.K., Pashkova G.I. // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 5 (1048). – P. 50–59. – Bibliogr.: 7.

Set out the technological features of the process of hot stamping followed crimp, designs and materials working parts stamping tooling, designed classifier forgings recommended for punching followed crimp. Found that stamping followed crimp characterized by higher rates of efficiency and quality of metal forgings material recommended for widespread use in the manufacture of forgings proposed groups.

Keywords: hot stamping, crimping, matrix, non-contact deformation.

Technological analysis of metal stress-deformed state during roll-forming of hardened bent profiles / Podzolkova Yu. A., Plesnetsov Yu. A. // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 5 (1048). – P. 60–65. – Bibliogr.: 11.

Using the method of resistance of materials to plastic deformation determined the stress-strain state of the metal when forming the corrugations on the elements of reinforced profiles and profiles with anti-skid surface. Using the principle of energy balance and deformation stand rigidity analytical dependences for determining power parameters of the process of forming the elements of anti-skid surface and corrugations. Minimization of the total potential energy functional solved the problem of finding the actual height of the corrugations and their precipitation.

Keywords: stress-strain state, power parameters, corrugations, the actual height, draft.

Defining the attenuation coefficient of the magnetic field in industrial microwave chamber / Sebko V.V., Babenko V.N., Ryabovol Ye. N. // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies

and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 5 (1048). – P. 65–72. – Bibliogr.: 12.

An algorithm of joint control of measuring the attenuation coefficient h_t , relative permeability μ_{rt} , conductivity σ_t and temperature t of microwave chamber wall using an eddy current device screen. Four-parameter proposed eddy current technique of measuring relative permeability control μ_{rt} , conductivity σ_t , temperature t and the damping coefficient h_t uniform magnetic field in the wall of the microwave chamber. The basic relations describing four-parameter screening method.

Keywords: microwave chamber, measuring algorithm of joint control, eddy current device.

Forming of panels with longitudinal ribbing by local bending with fit (separation) / Sikulskiy V. T. // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 5 (1048). – P. 72–79. – Bibliogr.: 3.

Given is the description for new process of obtaining panels of complex forms by local deforming with the use of original device in which the local rib bend with joint deformation of fit and separation is realised. Exemplified in obtaining panels of double curvature the comparative characteristics of fit and separation processes are given. The engineering technique of local exposures distribution is given, the test results of the process on aluminum alloy samples are described and main technological guidelines are given.

Keywords: forming, fit, separation, bend, form finish, double curvature.

Trends in equipment upgradation of pipe-rolling plant 5-12" with pilger mills INTERPIPE NTRP / Stasevskiy S.L., Stepanenko A.N., Ugrumov Yu. D., Pavlovskiy B.G., Uryumov D. Yu. // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 5 (1048). – P. 80–94. – Bibliogr.: 2.

The problems of modernization and reconstruction of pilger unit 5-12" PJSC "Interpipe NTRP." Modernization and reconstruction of TPA 5-12" will significantly extend the life of the unit and improve its technical and economic indicators. The introduction of technology and equipment for the preparation of the front end of the sleeve is an important and promising events, provide production volume increase ~ 12 tons of pipes per year. As a result of the phased implementation of activities for 5-12" TPA production growth will be 60-70 thousand tons of pipes per year.

Keywords: pipe, pilger aggregate, revamping, upgradation.

Improving the efficiency of surface grinding process on the basis of analysis of the influence of dynamic factors / Strel'chuk R.M. // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 5 (1048). – P. 94–99. – Bibliogr.: 2.

At processing preparations on grinding machine tools often there are vibrations, which of deterioration of units of the machine tool, reduce accuracy, increase a roughness and sinuosity of the processed surface, increase the charge of the tool. Proceeding from this, the finding by a settlement and experimental way of borders of area of steady job is a urgent scientific and practical task.

Keywords: grinding process, the depth and the width of the shear layer, the cutting speed, the estimated productivity of the machine.

EDM device for making models for cracks / Khomyak Yu. V. // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 5 (1048). – P. 99–105. – Bibliogr.: 13.

The analysis of common methods and tools EDM metalworking. Studied their features for manufacturing defect models for studies of eddy current controls. Designed and manufactured unit for the manufacture of artificial defects of metal samples. The operation of the electronic circuit of the pulse generator, it was found that an acceptable mode of processing in which the electro-erosion process proceeds steadily pulse duration - 1.5-3 ms, repetition frequency - 20-40 kHz, amplitude - 200 V.

Keywords: eddy current, an artificial defect, electro-discharge machining, converter,, pulse, the transistor.

Increasing drawing degree of sheet parts in liquid pneumatic-mechanical forming / A. Frolov Ye. , Kravchenko S. I. , Nosenko O. G., Yasko S. G. // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies

and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 5 (1048). – P. 105–111. – Bibliogr.: 4.

Ways to increase drawing degree of sheet parts in liquid pneumatic-mechanical forming are considered as well as analytically and experimentally researched. The dependencies that allow manufacturing process design of high-speed stamping of sheet-metal parts controlled by the size of artificial drawing ribs of forming dies for T1324 liquid pneumatic-mechanical forming machinery were obtained.

Keywords: high-speed drawing, drawing degree, liquid pneumatic-mechanical forming, sheet parts, manufacturing process.

Development of technologies and equipment for causing of the combined wearproof coverages on detail of type of billow / Borodiy Yu. P. // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 5 (1048). – P. 111–119. – Bibliogr.: 4.

The article is devoted development of technologies of the superficial strengthening of details of machines as billows by creation of the combined multi-layered wearproof coverages with the set properties. The got results present practical interest for technological developments which provide forming of coverages with necessary operating properties for the different terms of work of details of machines, and also information about possibility of change of properties of coverages. Causing of electro-spark coverages increases operating firmness of details of machines in 3-6 times.

Keywords: superficial strengthening, details of machines, electro-spark alloying, superficial flowage, wearproof coverages.

Impulse crimp of cylindric shell / Lotous V.V., Naumova Ye.A., Dragobetskiy V.V. // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 5 (1048). – P. 119–127. – Bibliogr.: 6.

The description of technologies of the cumulative charges, based on action, of explosive Description of technologies based on the effect of cumulative charges of an explosive substance on the treated material is given. The issues of using the explosive energy for disintegration and synthesis of chemical elements in the cumulative jet are considered. A qualitative description of the reduction process of a cylindrical envshell by the cumulative charge of an explosive substance is given. Corrugations formed at reduction of a shell become the sources of a system of cumulative jets. The researches have allowed to develop new technologies of explosive hardening and alloying and a method of physical modeling the reduction of viscous materials.

Keywords: explosive technologies, cumulation, plasma, chemical elements, explosive substances, corrugation forming.

Abrasion and crushing, as two kinds of stamping tools wear / Pavlenko V.N. // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 5 (1048). – P. 127–134. – Bibliogr.: 6.

The article is devoted to results of research of extent of strains distribution by volume of forgings subjected to deformation by the method of the grid line. It is established that most intensively elements of punch are distorted in initial stage. It is determined, that the scuffing and crumpling are the principal kind of wearing of stamping tool.

Keywords: high-speed volumetric deformation, forging, strain, crumpling, scuffing, punch.

Effect of nozzle shape on the technological parameters of the abrasive machining submerged jets / Andilakhay A.A., Ditinenko S.A., Novikov F.V. // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 5 (1048). – P. 134–139. – Bibliogr.: 5.

The results of experimental research to establish the most effective configuration of the nozzle by providing the maximum amount of abrasive grains injected into the jet into the abrasive slurry, based on a certain number of processed grains on polished brass plates screens. It is shown that the most dense arrangement of traces of abrasive grains is provided using a supersonic Laval nozzle. Consequently, the use

of a supersonic Laval nozzle provides a double effect of treatment: increasing flow rate and increasing the number of abrasive grains in a submerged jet of the injected compressed air.

Keywords: abrasion, abrasive grains, supersonic Laval nozzle, compressed air, brass, processing time profilogram

New method of analog modeling of kinematics of forging / Dobrov I. V., Semichev A. V., Novikov B. O., Get'man E. V. // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 5 (1048). – P. 140–149. – Bibliogr.: 7.

It is developed analog modeling of kinematics of process of forging of symmetric stock with flat dies using of compression spring at elastic and plastic deformation. It is based on the equations for describing of forming of stock in elastic and plastic zones of deformation which are the same. It is researched low of velocity of deformation of stock at forging depending on path of spring at dynamic loading. It is determined nature of deformation velocity of stock at forging at static and dynamic loading with change of path of spring. Low of deformation of active coils of compression spring depending on height is researched using of modern digital filming and personal computer. Computed values of velocities of deformation of stock are consistent with the results of experiment at forging of cylindrical stock in industrial conditions. Lower low of deformation can not be reached at processes of working of metals by pressure. Velocities of deformation of active coils of compression spring are different at forging at direction of force. The friction forces restrict forming of stock at forging.

Keywords: analog modeling, forging, compression spring, elastic, plastic deformation, deformation velocity.

Analytical determination and analysis of the parameters of the power intensity of the cutting process / Novikov F.V., Brizhan T.M., Kruk A.G., Klenov O.S. // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 5 (1048). – P. 149–155. – Bibliogr.: 6.

The paper proposes a mathematical model of the mechanics of the cutting process and provides analytic-tions to determine the dependence of the main parameters of the power intensity of the cutting process, including cutting force, the energy intensity of the treatment, the shrinkage factor chips. Theoretically, it is shown that the main way to reduce them is to improve the conditions of chip by reducing the radial component of cutting force using various ways crushing chips, reducing the coefficient of friction of the treated instrumentally and second materials, changing the angle of the chip from the front face of the blade, etc.

Keywords: machining, tool, the processed material, the force rezaniya energy intensity processing, shrinkage factor chip processing performance.

Analytical determination of the amplitude of oscillation at turning / Novikov F. V., Kruk A. G., Ryabekov I. A., Ivanov I. E. // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 5 (1048). – P. 156–161. – Bibliogr.: 6.

In the paper, we give an analytical solution determine the amplitude of self-oscillations excited by when turning due to friction with the rear surface of the tool material being processed in connection with the incident characteristic of the cutting force - the friction of the cutting speed. Theoretically grounded conditions of vibrations during turning and the ways to address them. Shown to reduce the amplitude of the oscillations can be due to a significant increase in cutting speed, increasing the rake angle cutter and reduce pad wear on the rear surface, applying for this, for example, diamond cutters.

Keywords: turning, tool, self-oscillation, the oscillation amplitude, cutting force, cutting speed, feed, playground wear.

Influence of technological factors on the effect of the process of polishing metal / Shkurupiy V. G., Ditenenko S. A. // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 5 (1048). – P. 162–170. – Bibliogr.: 9.

The basic condition of decreasing surface roughness with abrasive polishing nom. It is shown that the polishing efficiency is increased with increasing circumferential speed of the polishing pad up to 30 m / s (or higher) while reducing the abrasive grain. Found that the presence of coarse fractions of individual share of coarse grains reduces the quality of the machined surface (roughness) due to the presence of deep scratches. To reduce the processing time needed to grit abrasive for polishing does not exceed the maximum height of the original surface microroughness.

Keywords: abrasive machining, polishing, abrasive grit, the polishing speed, workpiece surface roughness

Analysis of the stress state during plastic bending of bilayer sheets with cladding layer outside / Zagoryanskiy V.G., Shapoval A.A., Mos'pan D.V. // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 5 (1048). – P. 170–178. – Bibliogr.: 6.

In the article, on the basis of analysis of the stressed state of double - layer sheets at a plastic bending a plating layer outside, a mathematical model is working out that it is possible to define distribution of tensions on the thickness of sheet. On the basis of these dependences the radius of curvature of neutral surface of tensions, necessary for determination of flexion moment and maximum and possible radiuses flexible double - layer sheets, is determined. The dependences allow to determine position of neutral layer in the double - layer sheets made from any metals. There is a similar problem that concerns the case of analysis of the stressed state of double - layer sheets at a plastic bending a plating layer inside. It is established that position of neutral surface of stresses depends on ratio of thicknesses basic and plating layers and on ratio of yield limit of metals of basic and plating layers. The analysis of bending of the plated metal with strengthening flows out from the task of analysis of plastic bending of the plated metal without strengthening.

Keywords: plastic bending, two-layer sheet, stress distribution, neutral surface of stresses, radius of curvature.

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»**

Збірник наукових праць

Серія
«Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів
у машинобудуванні та металургії»

Випуск 5 (1048) 2014

Науковий редактор: д-р техн. наук проф. А.П. Марченко

Технічні редактори: Т.Л.Коворотний, О.С. Курандо

Відповідальний за випуск канд. техн. наук Г.Б. Обухова

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ «ХПІ»
каф. обробки металів тиском, тел. (057) 707-60-40, 707-69-16,
e-mail: plesnetsov@gmail.com

Обл. вид. № 83-14

Підп. до друку 15.06.2014 р. Формат 60x84 1/16. Папір офсетний.
RISO-друк. Гарнітура Таймс. Ум.друк.арк. 8,6. Обл.-вид. арк. 8.9.
Наклад 100 прим. Зам. № 17. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 116 от 10.07.2000 р.

61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Друк ФОП Томенко Ю.І.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців,
виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції

ДК № 2779 від 28.02.2007 р.

Харків, м. Руднева, 4

(057) 757-93-82