ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(Кузнечно-прессовое, литейное и другие производства)

№ 10 октябрь 2014

Председатель редакционного совета и Главный редактор
СЕМЁНОВ Е.И., д.т.н., проф.

Зам. председателя редакционного совета:
ДЁМИН В.А., д.т.н., проф.
КОЛЕСНИКОВ А.Г., д.т.н., проф.

Зам. Главного редактора
СЕРИКОВА Е.А.

Редакционный совет:
БЕЛЯКОВ А.И., к.т.н.
БЛАНТЕР М.С., д.ф.-м.н., проф.
БОГАТОВ А.А., д.т.н., проф.
ГАРИБОВ Г.С., д.т.н., проф.
ГРОМОВ В.Е., д.ф.-м.н., проф.
ГУН И.Г., д.т.н., проф.
ЕВСЮКОВ С.А., д.т.н., проф.
ЕРШОВ М.Ю., д.т.н., проф.
КАСАТКИН Н.И., к.т.н., проф.
КИДАЛОВ Н.А., д.т.н., проф.
КОРОТЧЕНКО А.Ю., к.т.н., доц.
КОТЕНОК В.И., д.т.н.
КОШЕЛЕВ О.С., д.т.н., проф.
КРУК А.Т., д.т.н., проф.
ЛАВРИНЕНКО В.Ю., к.т.н., доц.
МОРОЗ Б.С., д.т.н., проф.
МУРАТОВ В.С., д.т.н., проф.
НАЗАРЯН Э.А., д.т.н., проф.
ОВЧИННИКОВ В.В., д.т.н., проф.
ПОВАРОВА К.Б., д.т.н., проф.
ПОЛЕТАЕВ В.А., д.т.н., проф.
СЕМЁНОВ Б.И., д.т.н., проф.
СУБИЧ В.Н., д.т.н., проф.
ТРЕГУБОВ В.И., д.т.н., проф.
ШАТУЛЬСКИЙ А.А., д.т.н., проф.
ШЕРКУНОВ В.Г., д.т.н., проф.
ШЕСТАКОВ Н.А., д.т.н., проф.
ШПУНЬКИН Н.Ф., к.т.н., проф.
ЯКОВЛЕВ С.С., д.т.н., проф.
ЯМПОЛЬСКИЙ В.М., д.т.н., проф.
БАСТ Ю., Dr.-Ing. habil., prof.
ТУТМАН Т., Dr.Yur.
ЭРКСЛЕБЕН С., Dr.-Ing.

Ответственные за подготовку и выпуск номера:
ЛУТОВИНИНА О.Н.
СЕРИКОВА Е.А.

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу агентства "Роспечать" **81580**, по Объединенному каталогу "Пресса России" **39205**, по каталогу "Почта России" **60261**) или непосредственно в издательстве.

Тел.: (499) 268-47-19, 268-69-19
Факс: (499) 269 48 97
Http: //www.mashin.ru
E-mail: zpm@mashin.ru, zpmpost@rambler.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Литейное и сварочное производства

Голубенцев А.В., Шатульский А.А. Влияние поверхностного модифицирования на усталостные характеристики отливок из сплава ЧС88У-ВИ 3

Малушин Н.Н., Осетковский В.Л., Осетковский И.В. Наплавка с низкотемпературным подогревом теплостойкими сталями деталей металлургического оборудования 6

Кузнечно-штамповочное производство

Яковлев С.С., Ларин С.Н. 75 лет кафедре "Механика пластического формоизменения" Тульского государственного университета 11

Семёнов Е.И., Айрапетян А.С., Дёмин М.В. Новый способ получения кольца методом сжатия 15

Ковалёв В.Г. Исследование точности при комбинированной раздаче 18

Лавриненко Ю.А., Марк Ван Тиль. Гибридные многопозиционные автоматы для холодной объемной штамповки 24

Прокатно-волочильное производство

Лабер К.Б., Дыя Х.С., Кавалек А.М. Анализ процесса многоуровневого охлаждения полосы при прокатке катанки диаметром 5,5 мм из стали для холодной осадки в блоке Моргана . . . 28

Материаловедение и новые материалы

Бурков А.А. Характер массопереноса при электроискровом осаждении твердого сплава ВК8 на сталь 35 в среде гранул 33

Угурчиев У.Х., Столяров В.В. Влияние импульсного тока при прокатке на деформируемость и микротвердость титановых сплавов 39

Информация

Кокорин В.Н., Кондратьев С.Ю., Кожин А.М., Щепочкин В.А., Сизов Н.А., Кокорин А.В. Оценка технико-экономической эффективности процессов прессования высокоплотных изделий методом порошковой металлургии 43

К 100-летию Евгения Александровича Попова (1914—1995) 48

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

Журнал выходит при содействии:
Академии Проблем Качества Российской Федерации; Министерства образования и науки Российской Федерации; Воронежского завода тяжелых механических прессов; ЦНИИЧермет; ВНИИМЕТМАШ; ИМЕТ РАН; Каширского завода "Центролит"; АМУРМЕТМАШ; ООО "МЕТАЛЛИТМАШ"; ФГУП ГНПП "Сплав"

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Заготовительные производства в машиностроении", допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции.

© Издательство "Машиностроение", "Заготовительные производства в машиностроении", 2014

SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

BLANKING PRODUCTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

(Forging and stamping, foundry and other productions)

№ 10 October 2014

Chairman of Editorial Committee and Editor-in-chief
SEMENOV E.I.

Chairman Assistants
DEMIN V.A.
KOLESNIKOV A.G.

Editorial Assistant
SERIKOVA E.A.

Editorial Committee
BELYAKOV A.I.
BLANTER M.S.
BOGATOV A.A.
GARIBOV G.S.
GROMOV V.E.
GUN I.G.
EVSYUKOV S.A.
ERSHOV M.Yu.
KASATKIN N.I.
KIDALOV N.A.
KOROTCHENKO A.Yu.
KOTENOK V.I.
KOSHELEV O.S.
KRUK A.T.
LAVRINENKO V.Yu.
MOROZ B.S.
MURATOV V.S.
NAZARYAN E.A.
OVCHINNIKOV V.V.
PASECHNIK N.V.
POVAROVA K.B.
POLETAEV V.A.
SEMENOV B.I.
SUBICH V.N.
TREGUBOV V.I.
SHATULSKY A.A.
SHERKUNOV V.G.
SHESTAKOV N.A.
SHPUN'KIN N.F.
YAKOVLEV S.S.
YAMPOLSKY V.M.
TUTMANN T.
BAST Yu.
ERXLEBEN S.

This issue prepared with assistance of specialists:
LUTOVININA O.N.
SERIKOVA E.A.

An advertiser is responsible for the promotional materials

Journal is spreaded on a subscription, which can be issued in any post office (index on the catalogue of the "Rospechat" agency **81580**, on the united catalogue "Pressa Rossii" **39205**, catalogue "Pochta Rossii" **60261**) or immediately in the edition of the journal.

Ph.: (499) 268-47-19, 268-69-19
Fax: (499) 269-48-97

CONTENTS

Foundry and Welding Productions

Golubentsev A.V., Shatul'sky A.A. Influence of surface modification on fatigue characteristics of ChS88U-VI-based alloy castings 3

Malushin N.N., Osetkovsky V.L., Osetkovsky I.V. Low-temperature heating surfacing by heat-resistant steels of metallurgical equipment parts 6

Forging and Stamping Production

Yakovlev S.S., Larin S.N. 75 years of department "Mechanics of plastic forming" of Tula state university 11

Semenov E.I., Ayrapetyan A.S., Demin M.V. New method of obtaining of ring by squeezing 15

Kovalev V.G. Research of accuracy due to combined expansion. 18

Lavrinenko Yu.A., Mark Van Til'. Hybrid multistation metal forming machines 24

Rolling and Drawing Production

Laber K.B., Dyya Kh.S., Kawalek A.M. Analysis of multilevel cooling process of strip during rolling of wire rod with diameter of 5,5 mm from cold upsetting steel in Morgan's block 28

Physical Metallurgy and New Materials

Burkov A.A. Character of mass transfer due to electrospark deposition of hard alloy VK8 on to steel 35 into granules medium 33

Ugurchiev U.Kh., Stolyarov V.V. Influence of pulse current on deformability and micro-hardness of titanium alloys due to rolling 39

Information

Kokorin V.N., Kondrat'ev S.Yu., Kozhin A.M., Shchepochkin V.A., Sizov N.A., Kokorin A.V. Evaluation of technical and economic efficiency of compaction processes of high-density products by powder metallurgy 43

To 110th anniversary of Evgeny Aleksandrovich Popov (1914—1995) 48

Journal is included into the list of the Higher Examination Board for publishing of competitors for the academic degrees theses

Reprint is possible only with the reference to the journal "Blanking productions in mechanical engineering"

© «Mashinostroenie Publishers», «Blanking productions in mechanical engineering», 2014

УДК 621.745.4

А.В. Голубенцев, А.А. Шатульский *(Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева)*

Влияние поверхностного модифицирования на усталостные характеристики отливок из сплава ЧС88У-ВИ

Показано, что поверхностное модифицирование оказывает положительное влияние на усталостные свойства отливок типа "лопатка" из никелевого жаропрочного сплава ЧС88У-ВИ за счет получения более однородной мелкозернистой структуры.

Ключевые слова: никелевый жаропрочный сплав; поверхностное модифицирование; предел выносливости.

It is shown that surface modification process influences positively on fatigue characteristics of ChS88U-VI nickel-based high-temperature blades due to more homogeneous fine-grained structure.

Keywords: nickel-based high-temperature alloy; surface modification; fatigue limit.

Технический прогресс в области изготовления газотурбинных двигателей (ГТД) в значительной степени определяется качеством и эксплуатационными характеристиками наиболее ответственных деталей – рабочих лопаток турбины, при этом одной из важных научно-технических задач является получение отливок с заданными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками.

Основные характеристики сплава, такие как прочность, пластичность, сопротивление усталости, определяющие работоспособность материала при эксплуатации, являются структурно-чувствительными. В данном случае под структурой сплавов следует понимать фазовый состав, размер макрозерен, ориентировку и строение границ зерен, размеры и морфологию первичных (кристаллизационных) и вторичных фазовых составляющих, а также степень ликвационной неоднородности.

Как известно, при изготовлении отливок типа "лопатка" методом литья по выплавляемым моделям макроструктура формируется в процессе затвердевания отливки, а проводимая затем термическая обработка позволяет лишь оптимизировать фазовый состав, структуру вторичных фаз и устранить возникшую ликвационную неоднородность [1].

Основными параметрами, определяющими процесс затвердевания отливки, а следовательно, и особенности формирующейся первичной структуры, являются число центров кристаллизации и скорость их роста. Однако при литье лопаток с равноосной структурой из-за скоротечности процесса затвердевания отливки регулирование скорости роста дендритов затруднительно, поэтому для регламентации структуры требуется создание в расплаве дополнительных центров кристаллизации.

В данной работе для введения в полость формы дополнительных центров кристаллизации использовали поверхностное модифицирование. Физический смысл процесса заключался в создании на поверхности литейной формы кристаллических соединений с кристаллографической структурой, близкой к структуре заливаемого сплава. Такие соединения согласно принципу размерного и структурного соответствия, имеющие ГЦК решетку, являются зародышами (центрами кристаллизации) в расплаве.

Для рассматриваемой группы сплавов такими частицами являются соединения атомов переходных металлов – железа, никеля, кобальта – с оксидами алюминия и кремния. В промышленности [2] нашли применение технологические процессы поверхностного модифицирования с использова-

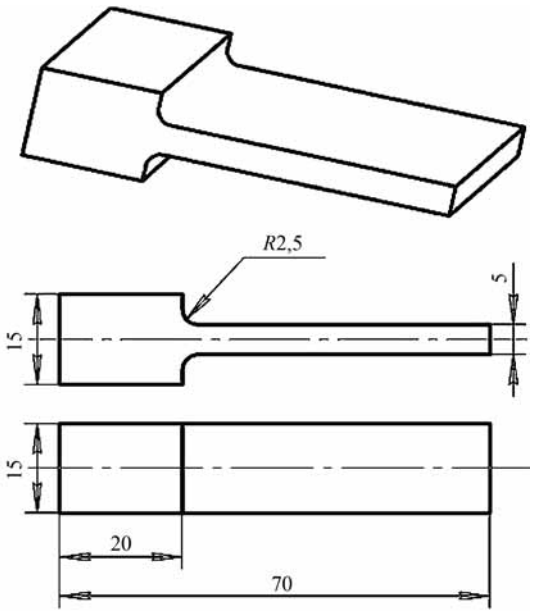


Рис. 1. Эскиз плоских образцов, имитирующих рабочие лопатки

нием в качестве модификатора алюмината кобальта $CoO \cdot Al_2O_3$.

Оценку влияния поверхностного модифицирования на усталостную прочность никелевого жаропрочного сплава ЧС88У-ВИ проводили на образцах, изготовленных методом литья по выплавляемым моделям. Для сравнительного исследования были изготовлены две группы плоских образцов, форма которых имитирует форму рабочих лопаток. Эскиз образцов представлен на рис. 1.

Образцы 1-й группы были изготовлены с применением технологического процесса поверхностного модифицирования, а образцы 2-й группы — без модифицирования. Поверхностное модифицирование осуществлялось посредством введения в облицовочную поверхность формы (первый слой огнеупорной суспензии) алюмината кобальта $CoO \cdot Al_2O_3$ в количестве 11 % от массы наполнителя суспензии.

Обе группы образцов прошли трехстадийную термическую обработку:

1-я стадия – закалка 1 (гомогенизация) по режиму: нагрев до температуры (1170 ± 10) °С, выдержка 6 ч, охлаждение в среде аргона со скоростью не менее 50 °С/мин;

2-я стадия – закалка 2: нагрев до температуры (1050 ± 10) °С, выдержка 4 ч;

3-я стадия – старение: нагрев до температуры (850 ± 10) °С, выдержка 16 ч.

Выполнены испытания образцов по определению предела выносливости сплава ЧС88У-ВИ с поверхностным модифицированием и без него. Под пределом выносливости σ_{-1} понимали предельное напряжение σ, которое может выдержать материал без разрушения при заданном числе циклов N.

Испытания образцов проводили стандартным методом на электродинамическом вибростенде при колебаниях образцов по первой изгибной форме, при комнатной температуре, на базе 20 млн циклов по ГОСТ РВ 2840-001–2008 "Надежность и безотказность авиационных двигателей. Лопатки газотурбинных двигателей. Методы испытаний на усталость". Предел выносливости подтвержден шестью несломавшимися образцами.

Результаты испытаний следующие: для образцов 1-й группы (с поверхностным модифицированием) предел выносливости σ_{-1} = 370 МПа, а для образцов 2-й группы (без поверхностного модифицирования) σ_{-1} = 290 МПа.

Таким образом, поверхностное модифицирование позволило повысить предел выносливости сплава ЧС88У-ВИ на 20 % от 290 до 370 МПа.

Металлографическое исследование испытанных образцов показало, что макроструктура образцов 1-й группы однородная, мелкозернистая, размер зерна составляет 0,7...1 мм; макроструктура образцов 2-й группы характеризуется разнозернистостью, размер зерен 2...11 мм.

Плотность зерен на единице площади для образцов с поверхностным модифицированием на порядок выше, чем в немодифицированном материале. Так, на тонкой части образцов (имитировавшей перо лопатки) количество целых макрозерен, укладывающихся в поле размером 100 мм^2 составляет: для образцов 1-й группы с мелкозернистой структурой от 35 до 40 зерен, а для крупнозернистого материала 2-й группы образцов от 1 до 3 зерен. Макроструктура образцов приведена на рис. 2.

Микроструктура материала образцов в обоих случаях (с поверхностным модифицированием и без поверхностного модифицирования) аналогичная, характерная для сплава ЧС88У-ВИ: состоит из аустенитного зерна, зигзагообразные границы которого декорированы частицами карбидов, в виде мелких округлых частиц розоватого цвета (рис. 3).

В микроструктуре присутствуют колонии эвтектических образований ($\gamma + \gamma'$). В осях и межосных пространствах дендритов наблюдается равно-

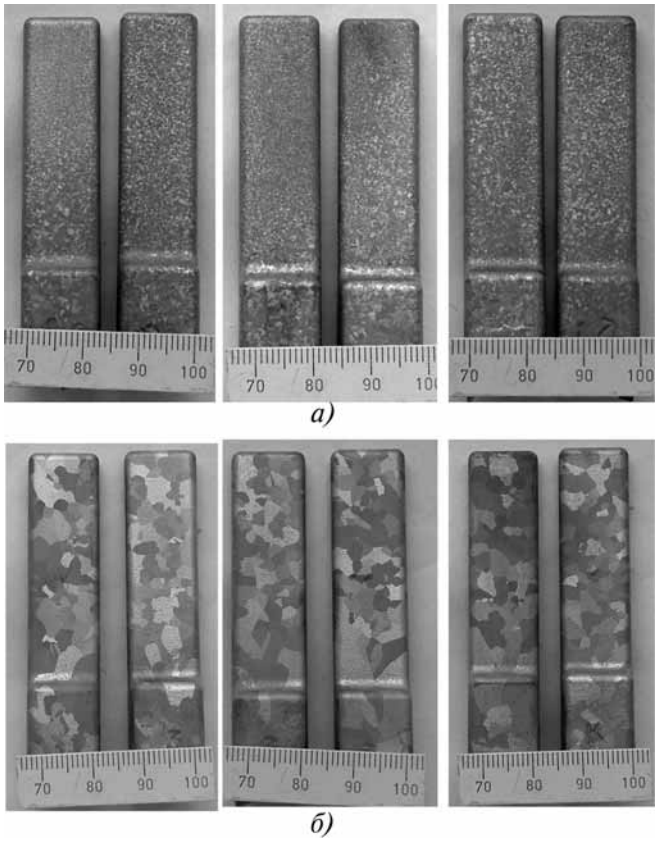


Рис. 2. Макроструктура испытанных образцов:
а — 1-я группа (с модифицированием); *б* — 2-я группа (без модифицирования)

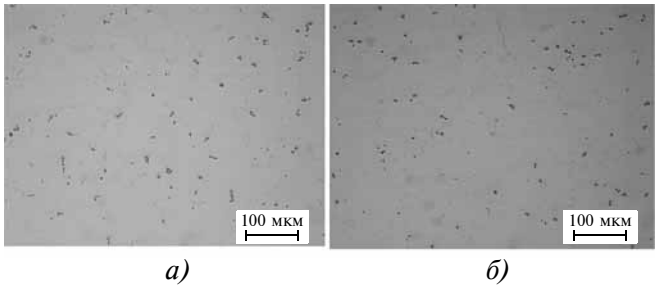


Рис. 3. Микроструктура сплава ЧС88У-ВИ (карбиды) с поверхностным модифицированием (*а*) и без модифицирования (*б*). × 200

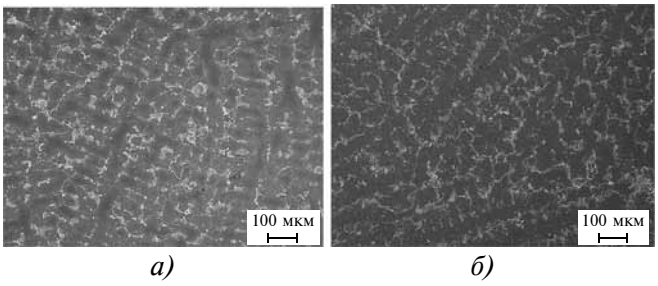


Рис. 4. Микроструктура сплава ЧС88У-ВИ (дендритное строение) с поверхностным модифицированием (*а*) и без модифицирования (*б*). ×100

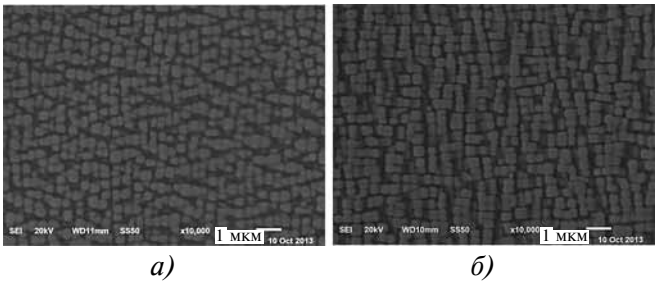


Рис. 5. Микроструктура сплава ЧС88У-ВИ (вид кубических частиц γ′-фазы) с поверхностным модифицированием (*а*) и без модифицирования (*б*). × 10000

мерное распределение кубических частиц γ′-фазы размером 0,4...0,5 мкм (рис. 4 и 5).

В результате анализа состояния структуры сплава ЧС88У-ВИ при поверхностном модифицировании сделаны следующие выводы:

1. Технологический процесс поверхностного модифицирования устраняет разнозернистость сплава ЧС88У-ВИ, формирующуюся при литье по выплавляемым моделям в нагретые до температуры более 900 °С формы, и позволяет получать однородную мелкозернистую макроструктуру по всей высоте образцов. Микроструктура сплава остается неизменной.

2. Измельчение макроструктуры за счет применения поверхностного модифицирования приводит к увеличению предела выносливости сплава ЧС88У-ВИ от 290 до 370 МПа.

Таким образом, технологический процесс поверхностного модифицирования является эффективным инструментом в совершенствовании технологии литья лопаток с равноосной структурой, обеспечивающим стабилизацию структуры отливок и повышение служебных характеристик сплавов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Каблов Е.Н.** Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технологии, покрытия). М.: МИСИС, 2001. С. 235–240.

2. **Крымов В.В., Елисеев Ю.С., Зудин К.И.** Производство лопаток газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 2002. С. 216–231.

Артем Валерьевич Голубенцев;
Александр Анатольевич Шатульский, д-р техн. наук,
shatulsky@rsatu.ru

УДК 621.791.92

Н.Н. Малушин, В.Л. Осетковский
(ОАО "ЕВРАЗ Западно-Сибирский металлургический комбинат", г. Новокузнецк),
И.В. Осетковский
(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

Наплавка с низкотемпературным подогревом теплостойкими сталями деталей металлургического оборудования

Разработана технология наплавки деталей металлургического оборудования теплостойкими сталями высокой твердости с низкотемпературным подогревом, позволяющая за счет применения регулируемого термического цикла получать наплавленный металл без трещин в состоянии, близком к закаленному.

Ключевые слова: наплавка; теплостойкие стали; низкотемпературный подогрев; регулируемый термический цикл; сверхпластичность.

The welding technology of parts of the metallurgical equipment by heat-resistant steels with high hardness and low-temperature heating, allowing the use of adjustable thermal cycle to receive the deposited material without cracks in the condition close to tempered is developed.

Keywords: welding; heat-resistant steels; low-temperature heating; adjustable thermal cycle; superplasticity.

Наиболее полно требованиям, предъявляемым к наплавленному металлу для упрочнения деталей металлургического оборудования, соответствуют ставшие традиционными наплавочными материалами штамповые хромовольфрамовые теплостойкие и быстрорежущие стали.

Теплостойкие стали типа Р18, Р6М5, Р9, Р2М8, 3Х2В8, 3Х2В4Ф, Х10В14, 25Х5ФМС и др. обладают наряду с высокими служебными свойствами неудовлетворительной свариваемостью. Обычно для предотвращения образования холодных трещин традиционная технология наплавки предусматривает обязательное применение высокотемпературного предварительного и сопутствующего подогрева ($T_{под}$ = 400...700 °С) и замедленного охлаждения изделия. При этом происходит образование пластичных продуктов распада аустенита, обладающих низкой твердостью и износостойкостью, что в свою очередь вызывает необходимость проведения сложной термической обработки. В процессе термообработки биметаллического изделия не всегда удается полностью использовать свойства высоколегированного металла и обеспечить его максимальную твердость.

Одним из технологических приемов регулирования величины и характера распределения напряжений, а следовательно, величины и направления деформации, возникающей при закалке инструментальных быстрорежущих сталей, является использование эффекта кинетической пластичности при $\gamma \to \alpha$ мартенситном превращении. На использовании такой сверхпластичности основана правка изделий в процессе закалки ("закалка в штампе").

Эффект увеличения пластичности в быстрорежущих сталях при температурах на 50...80 °С ниже A_1 впервые обнаружен и исследован А.П. Гуляевым [1]. Однако практические пути использования этого явления не разработаны, возможность горячей деформации в области резко повышенной пластичности затруднена из-за узкого температурного интервала. Данные об эффекте сверхпластичности при $\gamma \to \alpha$ превращении в хромовольфрамовом наплавленном металле отсутствуют.

Цель работы – исследование эффекта кинетической пластичности (сверхпластичности) быстрорежущих сталей в целях доказательства возможности использования данного явления для уменьшения уровня остаточных напряжений в наплавленном металле и уменьшения вероятности образования холодных трещин, что позволяет осуществлять наплавку быстрорежущих сталей с низкотемпературным подогревом.

Исследование влияния эффекта кинетической пластичности на характер формирования временных и остаточных напряжений при охлаждении образцов из наплавленного на основу из стали 30ХГСА металла типа стали Р18 и стали 12Х17 проводили на установке тепловой микроскопии ИМАШ-5С-69. Образцы, имеющие форму двусторонней "лопаточки" с рабочим сечением 9 мм^2 и длиной рабочей части 46 мм, изготовляли из указанных сталей в отожженном состоянии. Общий

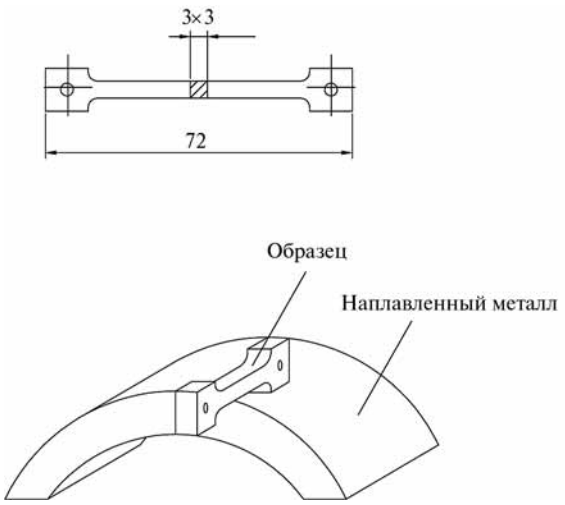


Рис. 1. Общий вид образца для высокотемпературных исследований и схема его вырезки из наплавленного металла

вид и схема вырезки образца из наплавленного металла приведены на рис. 1.

Проявление эффекта кинетической пластичности оценивали по снижению временных напряжений в процессе охлаждения жестко закрепленных образцов в интервале мартенситного превращения. Закрепление осуществляли с помощью электромеханического привода системы нагружения установки.

Образцы нагревали в вакууме $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. (1 мм рт. ст. = 133,322 Па) за счет теплоты, выделенной при протекании электрического тока. Нагрев проводили до температуры 800 °С, что ниже точки Ac_1, и до температуры 1200 °С, обеспечивающей высокую степень растворения карбидной фазы в аустените.

После нагрева и выдержки образцы жестко закрепляли для сохранения постоянства его длины при последующем охлаждении. Условия нагрева и охлаждения имитировали сварочный термический цикл. Неизменность длины обусловливала соответствующий рост упругопластической деформации образца при охлаждении.

Напряжения в образцах в процессе охлаждения непрерывно измеряли с помощью тензометрических датчиков с точностью ±1,5 %. Температуру определяли платина-платинородиевой термопарой, приваренной к средней части образца. Кинетика формирования временных напряжений в жестко закрепленных образцах в зависимости от температуры непосредственно фиксировалась на двухкоординатном потенциометре типа ПДП-4.

В качестве материала для исследования выбрана быстрорежущая сталь Р18, закаливающаяся на мартенсит, и хромистая коррозионно-стойкая сталь 12Х17, относящаяся к ферритному классу. Сталь 12Х17 не испытывает $\gamma \leftrightarrow \alpha$-превращения, в отличие от быстрорежущей стали, закаливающейся даже на воздухе.

Из данных рис. 2 видно, что при охлаждении образцов из стали Р18 с температуры 1200 °С наблюдается эффект кинетической пластичности при фазовом превращении, который проявляется в снижении временных напряжений в интервале мартенситных температур. Максимум напряжений на кривой формирования временных напряжений в стали составляет ~240 °С, что довольно близко температуре начала мартенситного превращения стали Р18 при ее закалке с температуры 1200 °С, а минимум 100 °С соответствует температурам $M_к^{усл}$, лежащим выше температуры конца мартенситного превращения $M_к$, при этом ($M_к^{усл} > M_к$), когда степень превращения уже достаточно велика и за счет образования прочного "каркаса" из многочисленных мартенситных кристаллов предел текучести возрастает, а пластичность сплава начинает уменьшаться.

В интервале мартенситного превращения временные напряжения снижаются в 1,5–2 раза по сравнению с величиной напряжений, накопившихся в аустенитной области.

При дальнейшем охлаждении ниже температуры $M_к^{усл}$ напряжения возрастают до 120...180 МПа в результате небольшого увеличения количества мартенсита. При охлаждении образцов из стали 12Х17 ввиду отсутствия фазового превращения эффект кинетической пластичности не проявляется. С понижением температуры напряжения непрерывно увеличиваются и достигают значений, значительно превышающих остаточные напряжения в стали Р18, претерпевшей мартенситное превращение.

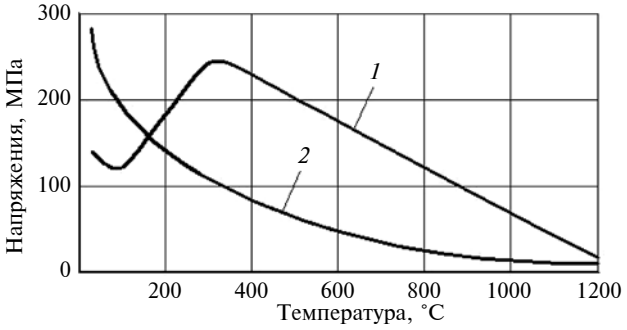


Рис. 2. Формирование временных напряжений в образцах из сталей Р18 (*1*) и 12Х17 (*2*)

При нагреве образцов до 800 °С, что ниже температуры Ac_1, из-за отсутствия фазового превращения как в ферритном, так и в закаливающемся металле типа стали Р18, при охлаждении эффект кинетической пластичности не наблюдается, и напряжения непрерывно возрастают.

Результаты исследования показали, что в хромовольфрамовом быстрорежущем металле наблюдается эффект повышенной пластичности в момент протекания мартенситного превращения. Аналогичные исследования были проведены при охлаждении наплавленного быстрорежущего металла в бейнитной области температур. При этом также отмечены проявление эффекта кинетической пластичности и снижение накопившихся напряжений.

Особенностью предложенных способов наплавки является применение низкотемпературного предварительного и сопутствующего подогрева ($T_{под}$ = 230...280 °С). Для получения наплавленного металла с низкой склонностью к образованию трещин регулируется уровень временных напряжений в процессе наплавки путем их частичной релаксации за счет проявления эффекта кинетической пластичности в момент протекания мартенситного или бейнитного превращений.

Особенность предлагаемого цикла наплавки заключается в трех его стадиях. Первая обеспечивает ограниченное время нагрева и повышенную скорость охлаждения в области высоких температур, предотвращает рост зерна и распад аустенита с образованием равновесных низкопрочных структур. Она может быть реализована применением высококонцентрированных источников нагрева (например, сжатой дугой) и сопутствующего охлаждения.

Вторая стадия термического цикла обеспечивает нахождение наплавленного металла в аустенитном состоянии при выполнении всех слоев в процессе наплавки. Это достигается применением подогрева с $T_{под} = M_н$ + (50...100 °С).

Для получения наплавленного металла с низкой склонностью к образованию трещин регулируется уровень временных напряжений в процессе наплавки на третьей стадии термического цикла путем временного снижения $T_{под}$ ниже температуры $M_н$. Временные напряжения снижаются в результате частичной релаксации в момент протекания мартенситного или бейнитного превращений. Это позволяет получить наплавленный металл в закаленном состоянии с низким уровнем остаточных напряжений. При этом упрощается процесс наплавки по сравнению с традиционной технологией, повышается производительность наплавки, максимально используются свойства наплавленного высоколегированного слоя [2].

На установках тепловой микроскопии ИМАШ-5С-69 и ИМАШ-20-75 исследовано влияние основных стадий термического цикла способов многослойной наплавки на упрочнение хромовольфрамового металла и стойкость против образования холодных трещин. Исследования на установках тепловой микроскопии позволили проследить кинетику изменения фазового состава и формирования временных напряжений в процессе нагрева и охлаждения по заданному термическому циклу наплавки.

Оценка склонности наплавленного металла к образованию холодных трещин, проводимая на основе анализа кинетики формирования временных напряжений в жестко закрепленных образцах, может служить только для сравнения между собой различных сварочных материалов, способов и режимов наплавки.

Данный метод оценки свариваемости относится к косвенным, при котором сварочный процесс заменен другим, имитирующим его процессом. Косвенные методы испытания следует рассматривать только как предварительные. Результаты их должны быть проверены путем прямых испытаний.

Данные, полученные при исследованиях на установках тепловой микроскопии, проверяли путем наплавки по разработанным способам заготовок из стали типа 30ХГСА диаметром 100 мм порошковыми проволоками разного химического состава.

Наплавку заготовки осуществляли на установке для плазменной наплавки тел вращения. Установка для плазменной наплавки деталей металлургического оборудования (прокатных валков и роликов) скомпонована из серийно выпускаемого оборудования.

Для плазменной наплавки нетоковедущей порошковой проволокой применяли установку, состоящую из манипулятора, задней бабки, модернизированного аппарата А-384 и пульта управления. Источником питания служит выпрямитель аппарата АПР-401У4. В качестве плазмотрона использован плазмотрон, разработанный сотрудниками СибГИУ кафедры "Металлургия и технология сварочного производства" и успешно зарекомендовавший себя в эксплуатации.

Валки наплавляли плазменной дугой с подачей в сварочную ванну порошковой проволоки. Наплавку осуществляли по термическому циклу, представленному на рис. 3.

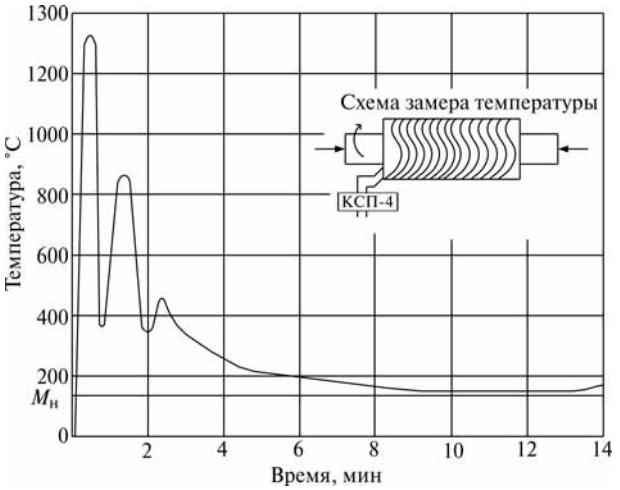


Рис. 3. Термический цикл при плазменной наплавке первого слоя валка холодной прокатки диаметром 100 мм

Заготовку с припусками под наплавку 10...12 мм на сторону устанавливали в центрах наплавочной установки, затем проводили предварительный подогрев до температуры 230 °С сжатой дугой без подачи порошковой проволоки. В процессе наплавки шейки валка охлаждались холодной водой с расходом ее до 2 л/мин. После завершения подготовительных операций осуществляли 4–6-слойную наплавку.

Режим наплавки рабочих валков стана холодной прокатки диаметром 100 мм и длиной бочки 315 мм: сварочный ток 150...160 А; напряжение на дуге 50...55 В; скорость наплавки 18 м/ч; скорость подачи порошковой проволоки 60 м/ч; смещение с зенита 10...12 мм; длина дуги 20 мм; расход защитного газа азота 20...22 л/мин; расход плазмообразующего газа аргона 6...8 л/мин. Наплавку проводили на заготовке из стали марки 30ХГСА с присадкой порошковой проволоки ПП-Р18ЮН диаметром 3,7 мм.

Параметры реального термического цикла с низкотемпературным подогревом и принудительным охлаждением шеек валка соответствуют рекомендуемым. В наплавленном металле отсутствуют трещины, поры и шлаковые включения. Твердость металла после наплавки порошковой проволокой ПП-Р18ЮН составляет 52...57 HRC. Структура наплавленного металла при этом близка по своему составу к структуре быстрорежущей стали типа Р18 в закаленном состоянии и состоит из мартенсита (около 30 %), карбидов (до 10 %) и остаточного аустенита (до 60 %).

3–4-кратный высокотемпературный отпуск при температуре 580 °С увеличивает твердость наплавленного металла до 62...64 HRC, что объясняется превращением остаточного аустенита в мартенсит и эффектом дисперсионного твердения.

Наплавленные быстрорежущие стали типа Р18, не подвергавшиеся термической обработке, содержат повышенное количество остаточного аустенита, имеют более легированный $\alpha + \gamma$-твердый раствор и пониженную твердость по сравнению с наплавленными, термически обработанными сталями.

Повышенное количество остаточного аустенита и более высокую легированность твердого раствора наплавленных сталей можно объяснить ускоренным охлаждением металла с температур, превышающих оптимальные температуры закалки быстрорежущих сталей, и замедленным охлаждением в интервале мартенситного или бейнитного превращений. Твердость после высокого отпуска наплавленных, быстрорежущих сталей равна или несколько выше твердости термически обработанных сталей. Характерная структура наплавленного металла Р18ЮН после многослойной наплавки приведена на рис. 4.

Таким образом, термическую обработку наплавленных деталей и инструмента можно ограничить отпуском на вторичную твердость без предварительного отжига и закалки. Это существенно упрощает технологический процесс и дает экономию при изготовлении биметаллического инструмента.

Оптимальное сочетание свойств наплавленного металла и низкого уровня остаточных напряжений обеспечивает наплавка порошковой проволокой ПП-Р18ЮН, легированной углеродом, хромом, вольфрамом, алюминием, азотом и никелем. Наплавка порошковой проволокой типа ПП-Р18ЮН обеспечивает получение плотного металла. Холод-

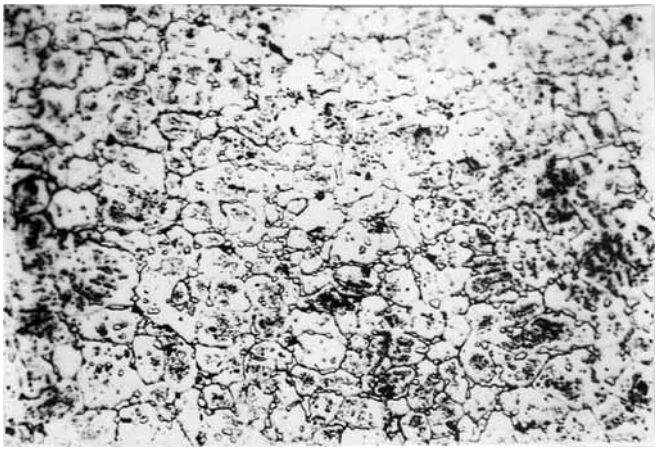


Рис. 4. Структура наплавленного металла Р18ЮН. × 340

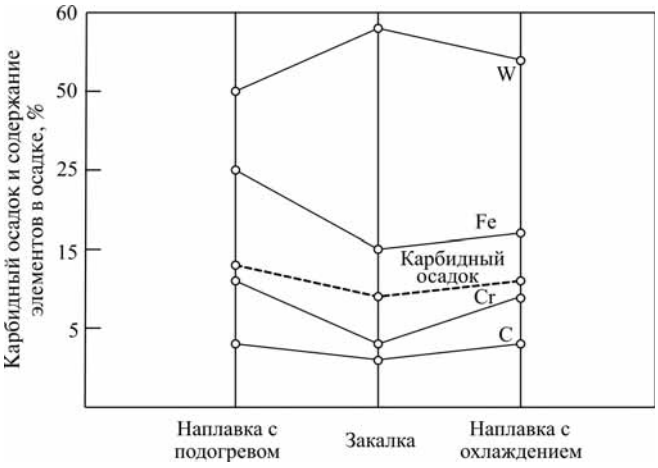


Рис. 5. Количество карбидного осадка, состав карбидов наплавленного металла типа Р18 в зависимости от условий наплавки

ные трещины в нем не обнаружены. Свойства наплавленного металла приближаются к свойствам закаленных сталей.

Количество карбидного осадка, состав карбидов наплавленного металла типа Р18 в зависимости от условий наплавки показаны на рис. 5 [3].

Из данных рис. 5 видно, что при медленном охлаждении, рекомендуемом традиционно для предотвращения образования холодных трещин в наплавленном металле [1], происходят увеличение количества выделившихся карбидов и обеднение аустенита. В закаленном наплавленном металле количество карбидов уменьшается, а следовательно, увеличивается степень легированности твердого раствора. Это позволяет значительно увеличить твердость при последующем отпуске закаленного металла.

Плазменная наплавка с низкотемпературным подогревом и сопутствующим охлаждением позволяет получать металл в состоянии, приближающемуся к закаленному непосредственно по окончании процесса, что позволяет исключить процесс последующей закалки и упростить технологию получения наплавленного металла с высокой твердостью. Последующий отпуск увеличивает вторичную твердость.

Промышленные испытания в реальных заводских условиях подтвердили результаты прямых и косвенных исследований свойств наплавленного теплостойкого металла. Установлено, что изготовленные с применением плазменной наплавки активного слоя теплостойкими сталями высокой твердости с регулируемым термическим циклом и низкотемпературным подогревом рабочие валки стана холодной прокатки 6/100Х315 полностью пригодны для условий прокатки труднодеформируемых сплавов и сталей при повышении в 1,5–2,0 раза стойкости по сравнению с серийными валками.

Увеличение износостойкости наплавленных валков можно объяснить наличием в структуре мелкодисперсных карбидов M_6C и MC. Наличие в поверхностном слое наплавленных валков сжимающих напряжений и отсутствие резкого перехода сжимающих напряжений в растягивающие, вероятно, также способствуют повышению износостойкости.

Заключение. Плазменная наплавка с низкотемпературным подогревом позволяет получить качественный наплавленный металл с высокой твердостью, близкой к твердости закаленного металла, без трещин и пор. Температура подогрева в разработанных способах наплавки снижается в 2,0–3,0 раза по сравнению с традиционными способами наплавки. При этом упрощается процесс наплавки, повышается ее производительность, максимально используются твердость и износостойкость наплавленного высоколегированного слоя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Малушин Н.Н., Валуев Д.В.** Обеспечение качества деталей металлургического оборудования на всех этапах их жизненного цикла путем применения плазменной наплавки теплостойкими сталями. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. 358 с.

2. **Малушин Н.Н., Вострецова Т.Г.** Регулируемый термический цикл для плазменной наплавки прокатных валков теплостойкими сталями // Заготовительные производства в машиностроении. 2014. № 3. С. 14–16.

3. **Малушин Н.Н., Осетковский В.Л.** Наплавка деталей металлургического оборудования теплостойкими сталями высокой твердости с низкотемпературным подогревом // Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика: в 2 ч. Ч. 1. Материалы 16-й Междунар. науч.-практ. конф. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. С. 104–110.

Николай Николаевич Малушин, канд. техн. наук,
nmalushin@mail.ru;
Василий Леонидович Осетковский;
Иван Васильевич Осетковский

Яковлев С.С., Ларин С.Н. *(Тульский государственный университет)*

75 лет кафедре "Механика пластического формоизменения" Тульского государственного университета

Осенью 2014 г. исполняется 75 лет кафедре "Механика пластического формоизменения" (ранее кафедра "Технология штамповочного производства") Тульского государственного университета.

В 1939 г. в соответствии с требованиями промышленности в действующем тогда Тульском механическом институте (ТМИ) была организована подготовка специалистов по холодной и горячей обработке металлов давлением.

В довоенное и военное время подготовку специалистов осуществляли по ускоренным учебным программам.

После окончания войны подготовку студентов вели по нормальной учебной программе. На кафедру пришли молодые преподаватели: К.В. Лебедев, В.В. Шевелев, И.П. Обозов, Б.И. Успенский и опытные производственники: С.В. Аврутин, В.И. Давыдов, А.Н. Малов, а также И.П. Ренне, окончивший первый выпуск в ТМИ по специальности "Горячая штамповка".

С 1946 по 1954 г. кафедрой "Технология штамповочного производства" руководил А.Н. Малов, а в период с 1954 по 1956 г. и с 1956 по 1961 г. заведующими кафедрой были доцент И.П. Ренне и профессор Е.А. Попов.

Основное научное направление кафедры было связано с исследованием процессов вытяжки с утонением стенки, обжима краевой части заготовки, гибки, отбортовки. Исследования по гибке листовых заготовок, выполненные И.П. Ренне, стали классическими, и нашли отражение в учебниках, монографиях и справочниках.

В этот же период получили начальное развитие идеи нового метода исследования деформированного состояния при сложном нагружении в процессах обработки металлов давлением с помощью координатной сетки, разработанные И.П. Ренне. Этот метод широко применяют и в настоящее время при анализе процессов штамповки.

Результаты проведенных исследований стали основой для защиты кандидатских диссертаций. Так, в 1953 г. кандидатскую диссертацию защитил И.П. Ренне, в 1963 г. И.П. Обозов, а в 1957 г. докторскую диссертацию защитил Е.А. Попов.

С 1956 по 1962 г. на кафедре проводили исследования совмещенных процессов листовой штамповки в целях их интенсификации, разработку методики построения кривых истинных напряжений и исследования на ее базе механических свойств листовых металлов.

Одновременно вели исследования по установлению влияния режимов термической обработки и эффективности действия смазки при горячей штамповке на стойкость и износ штампов. Изучено влияние легирующих элементов на свойства штамповых сталей и разработана методика определения износа штампов.

В 1963 г. был организован Тульский политехнический институт (ТПИ), а механико-машиностроительный факультет переименован в механический. В его состав вошла кафедра "Технология штамповочного производства", которую возглавил И.П. Ренне (1963–1970 гг.). Им были подготовлены свыше 50 кандидатов и 3 доктора технических наук.

В 1964 г. при кафедре была организована отраслевая научно-исследовательская лаборатория № 5 (ОНИЛ-5), открыта аспирантура. К этому времени кафедра пополнилась молодыми сотрудниками, защитившими кандидатские диссертации (С.А. Валиев, А.С. Базык, С.П. Яковлев), а также способными специалистами – выпускниками и производственниками (А.С. Маленичев, Н.В. Купор, А.К. Евдокимов и др.).

Открытие ОНИЛ-5 и аспирантуры способствовало дальнейшему развитию научно-исследовательской работы, развитию связей с производством и подготовки научных кадров.

В 1971 г. докторскую диссертацию защитил И.П. Ренне, а в 1972 г. была защищена докторская диссертация С.П. Яковлевым, который в 1970 г. был назначен руководителем кафедры и руководил ею свыше 30 лет.

Основным направлением научной деятельности С.П. Яковлева являлась разработка методов анализа и расчетов статических и динамических процессов обработки металлов давлением на основе создания обобщенных математических моделей, в которых учитываются реальные свойства анизотропии и неоднородности механических свойств материала. Эти разработки позволяют научно обосновать выбор рациональных технологических параметров процессов обработки металлов давлением, обеспечивающих интен-

сификацию процессов, экономию материалов и повышение качества получаемых изделий.

С.П. Яковлев являлся руководителем научной школы "Теория и технология формоизменения изотропных и анизотропных упрочняющихся материалов при различных термомеханических режимах в процессах обработки давлением".

По этому научному направлению с 1968 г. началась подготовка кадров высшей квалификации. Под научным руководством и при консультации С.П. Яковлева выполнили и защитили кандидатские диссертации свыше 100 человек. С.П. Яковлев осуществлял консультации при выполнении докторских диссертаций 35 соискателей.

В 2004 г. заведующим кафедрой "Механика пластического формоизменения" был назначен д. т. н., проф. С.С. Яковлев.

Основные научные результаты кафедры относятся к разработке теоретических методов определения деформаций при плоском стационарном и нестационарном пластическом течении, способов решения смешанной краевой задачи, экспериментального подхода к оценке деформаций при стационарном течении на базе теории пластического течения.

В это же время получили развитие теоретические методы учета влияния начальной анизотропии и неоднородности материала в расчетах технологических параметров процессов обработки металлов давлением. Были установлены режимы ведения процесса вытяжки цилиндрических и коробчатых деталей, позволяющие получить оболочки практически без образования фестонов, что исключало операцию подрезки торца и экономило металл.

Активно проводились работы по развитию теории обработки металлов давлением анизотропных материалов при различных температурных условиях деформирования. Предложен вариант теории пластичности начально-ортотропного тела с анизотропным упрочнением, который основан на условии текучести Мизеса–Хилла, неоднородном расширении поверхности нагружения без перемещения в шестимерном пространстве напряжений, связанном с главными осями анизотропии, и предполагающей справедливость ассоциированного закона течения. Введены деформационные или энергетические параметры упрочнения. Рассмотрены одно- и многопараметрические модели анизотропного упрочнения. Разработан подход к выбору математической модели анизотропного упрочнения ортотропного тела для анализа процессов пластического формоизменения.

Для анализа процессов формоизменения анизотропного листового материала при медленном горячем деформировании были сформулированы уравнения связи между скоростями деформаций и напряжениями, получены уравнения состояния при ползуче-пластическом деформировании (кратковременной ползучести)

Коллектив кафедры, 2014 г.

анизотропного материала. Разработаны феноменологические модели разрушения (энергетическая и деформационная) анизотропного листового материала при кратковременной ползучести, основанные на принципе линейного накопления повреждаемости в области пластической деформации и деформации ползучести.

Все это способствовало развитию и совершенствованию методической работы и улучшению многоуровневой подготовки бакалавров, инженеров и магистров, которых выпускает кафедра с 1992/93 учебного года.

Подготовку магистров проводят по направлениям 150700 "Машиностроение" профиля "Машины и технологии обработки металлов давлением", направлению 151000 "Технологические машины и оборудование" профиля "Теория и технология штамповки анизотропных заготовок" и профиля "Высокоэффективные методы обработки металлов давлением".

В 1996 г. состоялся первый выпуск бакалавров, а в 1998 г. – первый выпуск магистров. Введение многоуровневой подготовки потребовало большой работы над учебными планами и методической подготовки, связанной с пересмотром многих методических указаний и пособий. На кафедре были введены специализации по "Технологии горячей штамповки" и "Технологии холодной штамповки", предусматривающие подготовку на базе научных достижений кафедры, был подготовлен цикл новых дисциплин, раскрывающих особенности штамповки анизотропных материалов, основы компьютерного моделирования, технологии магнитно-импульсной штамповки и ротационной вытяжки.

Взаимодействие с крупнейшими ведущими промышленными центрами и исследовательскими институтами и рядом крупнейших вузов страны позволило кафедре определить фундаментальный характер работ, состоящий в создании основ ресурсосберегающих процессов деформирования при изготовлении изделий машиностроения с высокими техническими требованиями.

Кафедра активно сотрудничает с рядом предприятий, таких как ОАО "НПО "СПЛАВ", ОАО "КБП", ОАО ЦКБА, ОАО "ТНИТИ", ОАО "Корпорация "Тактическое ракетное вооружение", РКК "Энергия" им. С.П. Королева", ОАО "ГНПП Техномаш", ОАО "НПО им. С.А. Лавочкина", ОАО "Государственный космический научно-производственный центр им. М.В. Хруничева", ОАО "НПО машиностроения", НПО "Энергомаш"; с машиностроительными заводами: ОАО "Штамп", Машзавод им. В.М. Рябикова, ОАО "НПО "Базальт", а также с вузами страны: МГТУ им. Н.Э. Баумана, Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ), Санкт-Петербургский государственный университет, Балтийский технический университет "Военмех" им. Д.Ф. Устинова, МГТУ "СТАНКИН", Южно-Уральский государственный университет, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", ОрелГТУ, Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, Московский авиационный институт, Самарский аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва, Липецкий ГТУ и др.

На кафедре МПФ активно осуществляют подготовку кадров высшей квалификации. За последние пять лет (2009–2013 гг.) под научным руководством ведущих ученых кафедры успешно прошли защиты 25 кандидатских и 5 докторских диссертаций.

Ежегодно сотрудники кафедры МПФ публикуют свыше 100 научных статей в центральной печати и межвузовских сборниках научных трудов и подают более 5 заявок на патенты РФ. На кафедре ежегодно выпускают по несколько монографий и учебных пособий, многие из которых имеют гриф учебно-методического объединения вузов РФ по университетскому и политехническому образованию. За последние 5 лет изданы 9 монографий, 10 учебных пособий, 2 учебника и 1 справочник.

В настоящее время проходит подготовка бакалавров техники и технологии направления 150700 "Машиностроение" профиля "Машины и технология обработки металлов давлением" и студентов, обучающихся по направлению 150200 "Машиностроительные технологии и оборудование" специальности 150201 "Машины и технология обработки металлов давлением".

На протяжении многих лет сотрудники кафедры проф., д. т. н. С.П. Яковлев, проф., д. т. н. С.С. Яковлев, проф., д. т. н. Н.А. Усенко, проф., д. т. н. В.И. Трегубов, проф., д. т. н. Г.В. Панфилов и проф., д. т. н. А.В. Черняев принимали и принимают активное участие в работе специализированных ученых советов по присуждению степеней кандидата и доктора наук в Тульском государственном университете и других вузах страны.

Достижения кафедры неоднократно демонстрировали на различных выставках и презентациях, таких, например, как Региональная выставка-ярмарка "Дни Тульской области в Москве" – выставочный комплекс в Сокольниках; Межрегиональная выставка-ярмарка конкурентоспособных проектов и разработок "Наследники Демидовых", г. Тула; Лейпцигская ярмарка, международных салонах изобретений, новой техники и товаров, международных выставках "Высокие технологии. Инновации. Инвестиции", Всемирном Салоне инноваций "Брюссель – Эврика", Российская молодежная научная и инженерная выставка с международным участием, Всероссийская научная конференция молодых исследователей в рамках Всероссийского научного форума молодых исследователей "Шаг в будущее" и Московский международный Салон изобретений и инновационных технологий "Архимед".

По результатам научно-исследовательской работы сотрудники кафедры неоднократно были удостоены звания лауреата премии имени С.И. Мосина (в 1976, 2002, 2006, 2008 и 2010 гг.) в области разработок военной техники, технологии и оборудования, имеющих двойное применение. Ежегодно сотрудники кафедры МПФ становятся лауреатами регионального конкурса "Инженер года".

В 1982 г. профессору С.П. Яковлеву была присуждена премия Совета Министров СССР за создание и внедрение новых технологических процессов и специального оборудования в области машиностроения. В 1998 г. проф. С.П. Яковлев и С.С. Яковлев были удо-

стоены Государственной премии РФ в области науки и техники за разработку научных основ и ресурсосберегающих процессов деформирования при изготовлении изделия машиностроения с высокими техническими требованиями, в 2006 г. – премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники за разработку комплекса технологий и научное обеспечение производственных процессов пластического формообразования особо ответственных деталей машиностроения из высокопрочных анизотропных материалов, а в 2011 г. проф. С.С. Яковлев в составе авторского коллектива был удостоен присуждения премии правительства в области образования за создание научно-учебно-педагогического комплекса по подготовке кадров высшей квалификации в области инновационных и высоких технологий обработки металлов давлением.

За большие достижения в области развития экономики России д. т. н., проф. С.П. Яковлев, С.С. Яковлев и В.И. Трегубов были удостоены звания лауреата премии имени А.Н. Косыгина Российского Союза товаропроизводителей (2005 г.), премии Тульской области в области науки и техники имени академика Б.С. Стечкина (2006 г.).

Работа, проводимая на кафедре, явилась базой для привлечения к научной деятельности студентов, подготавливаемых кафедрой.

Научно-исследовательская работа студентов на кафедре МПФ является практической составляющей учебного процесса, способствующей углубленному пониманию роли обработки металлов давлением в развитии машиностроения и перспектив совершенствования технологий. Благодаря проводимым исследованиям студент приобретает уверенность в надежности получаемых знаний и начинает формироваться его компетентность и опыт.

На кафедре успешно развивают научное направление – теория проектирования высокопроизводительных автоматических загрузочных устройств для штучных предметов обработки при загрузке их в технологические системы, прежде всего операций обработки давлением. Возглавляет это направление заслуженный деятель науки и техники, проф., д. т. н. Н.А. Усенко. Им подготовлены более 30 кандидатов наук и 3 доктора наук. Результаты исследований опубликованы в шести монографиях (в этом числе один справочник), получено более 100 свидетельств на изобретения.

Огромный вклад в работу со студентами внес проф., д. т. н. А.К. Евдокимов. Им основана научная микрошкола "Ступени мастерства". За последние пять лет студенческие работы под его руководством были посвящены вопросам: управления течением металла при обратном, комбинированном и комплексном выдавливании сложнопрофильных деталей из сплошных заготовок, комбинированного выдавливания стальных роликов для высоконагруженных приводных цепей конвейерного производства; учета влияния противонатяжения и противодавления при вытяжке с утонением через одну и две матрицы на режимы деформирования и разностенность; холодного и полугорячего выдавливания некруглых деталей из сплошных заготовок; характера деформирования при сварке давлением, обеспечивающих максимальную прочность сварного шва; разработки конструкций и технологий изготовления торообразных баллонов для хранения газа высокого давления; ротационной вытяжки миниатюрных деталей цилиндрической и конической форм из коррозионно-стойких материалов в обоймовых устройствах с подвижным опорным кольцом; штампуемости листовых материалов при изготовлении ступенчатых деталей, ребер в листах при художественной штамповке, кольцевых обечаек из коррозионно-стойких металлов; изготовления прутковых заготовок под холодное выдавливание путем отрезки с предварительной высадкой прутка и шнековой прокатки прутка.

Только в 2013 г. студенты и школьники научной микрошколы "Ступени мастерства" под руководством проф., д. т. н. А.К. Евдокимова участвовали в 52 научных вневузовских мероприятиях, ими опубликованы 37 научных работ; завоеваны 2 кубка и 13 медалей (в том числе 9 золотых); получены 62 диплома лауреата и участника; выигран 1 грант УМНИКа и по 1-му гранту ведется работа; получены 4 патента РФ: 3 на изобретения и 1 на полезную модель.

На кафедре много лет функционировало студенческое конструкторское бюро (СКБ) "Механик" – одна из форм студенческой научно-исследовательской работы. Работа СКБ тесно увязывалась с учебным процессом. Студенты выполняли реальные курсовые и дипломные проекты по курсу "Технология холодной штамповки". Разработанные конструкции штампов и технологических процессов внедряли на машиностроительных предприятиях РФ. Студенческое конструкторское бюро принимало участие в различных выставках, и его работы были неоднократно отмечены дипломами областных, зональных и всероссийских организаций, а также многочисленными грамотами.

За значительный вклад в теорию и технологию обработки металлов давлением в 1997 г. кафедре было присвоено имя Н. Демидова.

Свое 75-летие кафедра "Механика пластического формоизменения" встречает значительными достижениями во всех областях своей деятельности.

Несмотря на известные трудности в сфере высшего образования кафедра сохранила свой научный потенциал, на базе которого функционирует научная школа под руководством проф., д. т. н. С.С. Яковлева. В настоящее время на кафедре МПФ работают 8 докторов и 8 кандидатов технических наук.

За последние годы кафедра пополнилась молодыми, перспективными специалистами и это означает дальнейшее ее развитие на благо науки и российского образования.

Сергей Сергеевич Яковлев, д-р техн. наук,
mpf-tula@rambler.ru;
Сергей Николаевич Ларин, канд. техн. наук

УДК 621.98

Е.И. Семёнов, А.С. Айрапетян, М.В. Дёмин
(Московский государственный индустриальный университет)

Новый способ получения кольца методом сжатия

Предложен новый способ получения детали типа "кольцо" из овальной заготовки методом сжатия. Применение данного процесса позволяет получить большую экономию металла при штамповке. Представлены также данные экспериментальных исследований и результаты компьютерного моделирования процесса получения колец в программном комплексе PAM-STAMP. Полученные результаты компьютерного моделирования показали хорошую сходимость с экспериментальными данными.

Ключевые слова: обработка металлов давлением; листовая штамповка; сжатие заготовок; кольцевые детали; компьютерное моделирование.

New method of obtaining of ring from the oval blanks by squeezing is offered. The application of this process will allow getting great savings of metal by stamping. Experimental findings and results of computer simulation of obtaining of rings in the software package PAM STAMP. The results of computer simulation showed good convergence with the experimental data.

Keywords: metal forming; sheet-metal stamping; squeezing of blansk; rings; computer simulation.

В настоящее время существует процесс изготовления плоских колец из овальных заготовок растяжением [1]. Данный процесс реализуется путем сложной конструкции штампа. Также недостатком данного способа является возможная потеря устойчивости стойкости заготовок.

Схема предложенного процесса [2] (рис. 1) предполагает наличие в основном сжимающих напряжений, что более благоприятно для деформации внутреннего радиуса заготовки.

На рис. 1 представлена схема устройства для изготовления колец сжатием из исходной овальной заготовки с регулируемыми (сменяемыми) внутренними подпружиненными или другими упорами, расположенными внутри овального отверстия на расстоянии, меньшем внутреннего диаметра получаемого кольца.

Конструкция устройства состоит из боковых плит *1* и *2*, пуансона *3*, матрицы *4*, регулируемых (сменяемых) внутренних подпружиненных упоров *5*, выполненных с возможностью утапливания их при установке заготовки 6 в матрицу *4* устройства. В боковых плитах *1* и *2* сверху можно выполнить вертикальные прорези шириной, менее или равной ширине исходной заготовки *6* для удобства ее установки между плитами *1* и *2* (на рис. 1 условно не показаны).

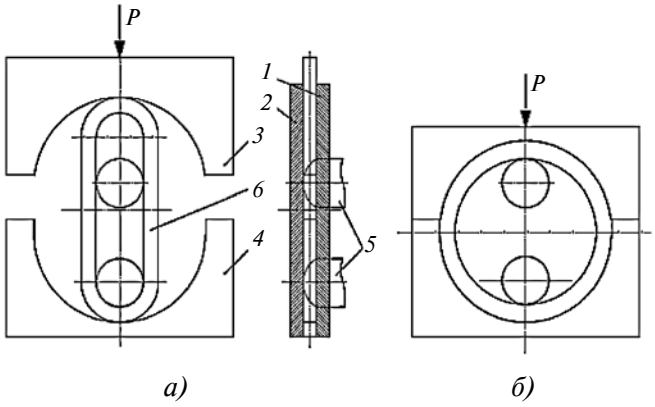
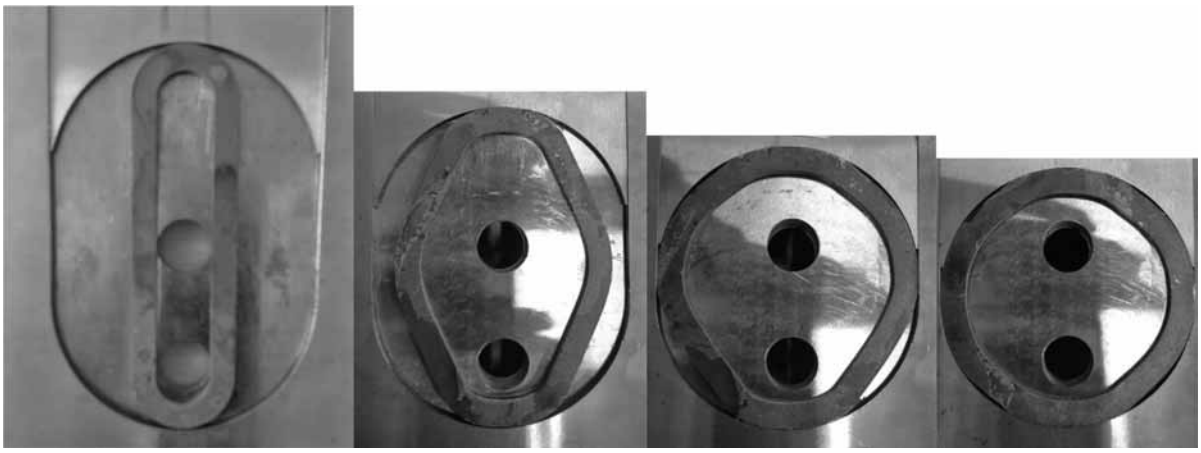


Рис. 1. Устройство для изготовления плоских колец:
а – начальный этап; *б* – окончательный этап

При исходном верхнем положении ползуна пресса пуансон *3*, закрепленный на ползуне, также находится в верхнем положении (см. рис. 1, *а*). В начальный момент установки заготовки *6* в матрицу *4* внутренние подпружиненные упоры *5* утапливаются, а затем под действием пружин (на рис. 1 условно не показаны) возвращаются в исходное положение, тем самым удерживая заготовку для избежания ее смещения в начале деформирования. После установки заготовки *6* в матрицу *4* ползун пресса двигается вниз, и пуансон *3* сжимает заготовку с силой *P* до достижения заготовкой требуемой формы кольца (например, формы круга) (см. рис. 1, *б*).

После достижения ползуном пресса нижнего положения и сжатия заготовки до требуемой формы кольца ползун перемещается в исходное верхнее положение, а полученное кольцо удаляют из устройства, например, выталкивателем (на рис. 1 условно не показан). При удалении полученного кольца из матрицы *4* внутренние подпружиненные упоры *5* вновь утапливаются, а затем под действием пружин возвращаются в исходное положение.

Согласно предложенной схеме изготовлен экспериментальный штамп и проведены экспериментальные исследования по получению кольцевых деталей из стали 08кп толщиной 3 мм, шириной 8 мм и наружным диаметром 82,2 мм (рис. 2).



а) *б)* *в)* *г)*

Рис. 2. Этапы получения кольца на экспериментальном штампе:
а – исходная заготовка; *б* – начальный этап; *в* – промежуточный этап; *г* – окончательный этап

Выбор данной стали обоснован ее высокой пластичностью и широким применением в номенклатуре деталей машиностроительного производства.

Поскольку необходимо последовательное исследование процесса сжатия заготовок и экспериментальный штамп изготовлен в вертикальном исполнении, то для экспериментальных исследований был использован гидравлический пресс – универсальная испытательная машина УИМ-100 номинальной силой 1 МН (рис. 3).

Одним из основных вопросов изготовления деталей сжатием является создание таких условий, которые обеспечивают получение изделий высокой точности без разрушения при минимальной внешней нагрузке.

Исследование особенностей формоизменения при операциях листовой штамповки основано на общей теории пластичности, и в частности на теории обработки металлов давлением. Преимуществами теоретических методов исследования являются возможность получения функциональных зависимостей, позволяющих выявить физические причины основных влияющих факторов процесса, а также возможности оптимизации существующих и создания новых технологических процессов.

Рис. 3. Общий вид пресса с экспериментальным штампом

Для оценки возможностей проведения операций листовой штамповки и определения технологических параметров в практических расчетах необходимы результаты численного решения и экспериментальной проверки.

Параметры предельного формоизменения при этих операциях ограничены локализацией деформации и разрывом, на которые существенно влияют толщина и марка материала, геометрия рабочего инструмента и силы трения.

Операция сжатия узких заготовок является сложной нестационарной контактной задачей теории пластичности, для решения которой целесообразно использовать численные методы.

Для моделирования листовой штамповки было принято решение исследовать процесс получения кольцевых деталей в программном комплексе PAM-STAMP, обеспечивающим высокую точность и надежность результатов при моделировании процессов листовой штамповки.

PAM-STAMP представляет собой интегрированный пакет подготовки производства штампованных деталей, в котором исключительно точно моделируется процесс холодной листовой штамповки заготовки под действием активных частей штампа.

PAM-STAMP позволяет на основе данных CAD модели перехода штамповки, описания характеристики штампуемого материала, параметров процесса штамповки и его кинематики, путем анализа результатов расчета оптимизировать:

- форму штамповой оснастки;
- размер и форму исходной заготовки;

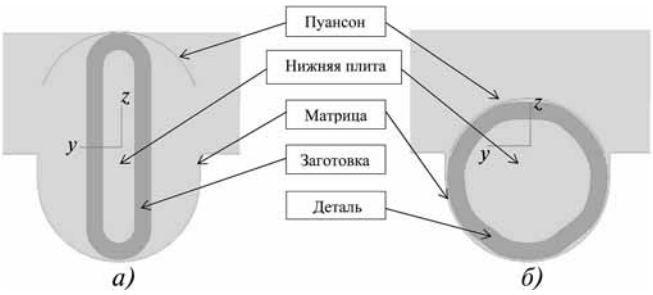


Рис. 4. Результаты компьютерного моделирования процесса штамповки колец в программном комплексе PAM-STAMP:
а – исходная заготовка; *б* – готовая деталь

- технологический процесс изготовления;
- условия трения и характеристики применяемой технологической смазки;
- вид, геометрические параметры и расположение тормозных элементов;
- расположение линии обрезки и т.д.

Процесс получения колец в программном комплексе PAM-STAMP исследовали для изучения процесса сжатия металла, выявления его особенностей и основных факторов, влияющих на характер деформирования металла и оценки степени этого влияния.

Основными задачами компьютерного моделирования процесса получения кольцевых заготовок являются:

1. Установление характера деформирования заготовок с различными размерными параметрами заготовок для получения кольцевой детали.

2. Определение предельных параметров и соотношений размеров заготовки для обеспечения возможности получения кольцевой детали без разрушения либо потери устойчивости в виде разрывов или складок.

3. Исследование влияния основных факторов на минимально допустимые радиусы сжатия.

На рис. 4 представлена созданная во встроенном модуле конечно-элементная модель заготовки, а также схема процесса сжатия заготовок для получения колец в начальном и конечном положениях.

В ходе процесса заготовку устанавливают в матрице и она ложится на нижней плите штампа (см. рис. 4, *а*). Радиус матрицы совпадает с наружным радиусом готовой детали ($R = 41{,}1$ мм). Сверху заготовка фиксируется прижимом (верхняя панель штампа) с учетом того, чтобы в ходе процесса она имела возможность передвигаться (сжиматься) вдоль оси z. Прижим используют для предотвращения искажения формы заготовки по оси y. Сжимающим инструментом служит пуансон, перемещающийся вдоль оси z. Радиус пуансона совпадает с наружным радиусом готовой детали. В данном случае пуансон также имеет радиус $R = 41{,}1$ мм.

При смыкании пуансона и матрицы (см. рис. 4, *б*) образуется полость диаметром, равным диаметру кольца $D = 82{,}2$ мм.

При компьютерном моделировании в программном комплексе PAM-STAMP принимали следующие допущения, упрощающие решение задачи:

1. *Схема напряженного состояния.*

При расчете процесса деформирования в программном комплексе PAM-STAMP заготовка была представлена в виде объемного тела ("volume blank"). Таким образом, схему напряженного состояния принимали объемной.

2. *Реологическая модель материала.*

В качестве реологической модели выбрана упругопластическая модель материала. В программном комплексе PAM-STAMP свойства материала задаются в виде кривой упрочнения в координатах σ, δ. Деформационная кривая упрочнения испытуемого материала (сталь 08кп) принята из базы данных материалов программного комплекса.

3. *Закон трения.*

При расчете процессов листовой штамповки для учета трения наиболее часто используют закон Кулона:

$$\tau = \mu p,$$

где μ – коэффициент трения, определяемый по нормальному напряжению (0,12);

p – нормальное напряжение в рассматриваемой точке контактной поверхности.

Исходными данными для моделирования процесса являлись:

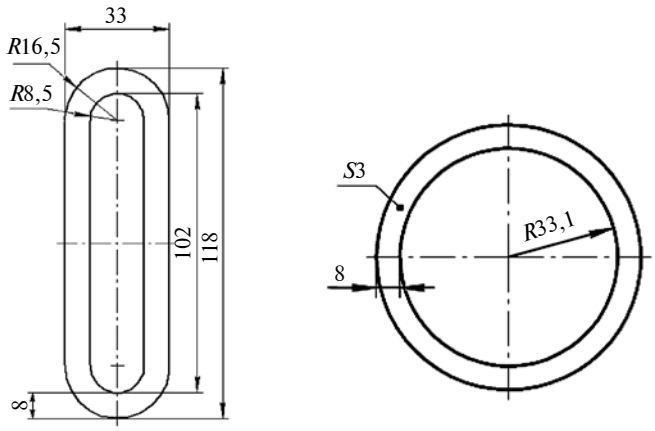
1. Трехмерные геометрические модели инструмента: матрицы, пуансона, нижних и верхних плит (прижима).

2. Технологические параметры процесса: скорость движения пуансонов 0,2 м/с; коэффициент трения 0,12.

3. Материал заготовки – лист, сталь 08кп (ГОСТ 1050–88), размеры заготовки.

Моделирование процесса получения колец в программном комплексе PAM-STAMP позволило определить размеры исходных овальных заготовок и уточнить технологические параметры процесса сжатия. Установлено, что на прямолинейных участках овальной заготовки происходит гибка, а на радиусном – сжатие, что приводит к уменьшению площади кольцевых деталей в плане. Следовательно, целесообразно применение исходных заготовок, не равных по площади кольцевым деталям в плане, а с несколько большей площадью.

На рис. 5 приведены чертежи заготовки и готовой кольцевой детали.



а) *б)*

Рис. 5. Заготовка (*а*) и готовая кольцевая деталь (*б*)

Исследования показали, что для получения кольцевых деталей с наружным диаметром 82,2 мм необходимо использование заготовок высотой 118 мм, наружным диаметром скругления 33 мм и внутренним диаметром 17 мм (см. рис. 5).

Полученные результаты моделирования процесса получения колец в программном комплексе PAM-STAMP показали хорошую сходимость с экспериментальными данными.

В настоящее время одним из основных направлений развития листовой штамповки является стремление получить штамповкой полностью законченную деталь, не требующую дальнейшей обработки и с минимальным отходом металла. При изготовлении колец остаются большие отходы. Так, при вырубке уходит в отход весь металл, ограниченный внутренним диаметром.

Применение данного процесса позволит производить подобные детали из листа и ленты более экономично.

По сравнению с обычной вырубкой таких колец из листа предлагаемое устройство обеспечивает снижение расхода металла до 50 % и выше.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Пат.** на полезную модель 111785 РФ. Устройство для изготовления плоских колец / В.А. Дёмин, Д.В. Ростовцев, Е.И. Семёнов, А.Е. Третьякова. 2011.

2. **Заявка** на пат. на полезную модель № 2014118913. Устройство для изготовления плоских колец / Е.И. Семёнов, В.Ю. Лавриненко, А.С. Айрапетян, М.В. Дёмин, Е.И. Ястребов. Дата поступления 13.05.2014.

Евгений Иванович Семёнов, д-р техн. наук;
Армен Саакович Айрапетян, канд. техн. наук,
asayr@mail.ru;
Михаил Викторович Дёмин

УДК 621.83(075.8)

В.Г. Ковалёв
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

Исследование точности при комбинированной раздаче

Предложена методика определения точности, пригодная для любых материалов и любых размеров изготовленных элементов деталей при комбинированной раздаче с растяжением. В основе этой методики находятся общие закономерности процессов пластического и упругого деформирования металлов. При решении задачи учтены все особенности конструкционных материалов, состоящие в непостоянстве их механических характеристик. Установлены величины деформации разгрузки, позволяющие определить рассеивание деформации разгрузки и размеров. Решение этого вопроса позволило оптимизировать процесс — достижение предельной возможной точности за счет исключения влияния систематической погрешности.

Ключевые слова: раздача; утонение; напряжения; упругие деформации; точность; оптимизация; погрешности.

Method of determining of accuracy suitable for any materials and any sizes made items due to combined expansion is offered. In the basis of this method are general regularities of the processes of plastic and elastic deformation of metals. When solving the problem takes into account all peculiarities of structural materials consisting shifting their mechanical characteristics. The values of unloading deformation allowing to determine the dispersion of deformation of unloading and sizes. The decision of this question allowed to optimize of the process achievement of the limit possible accuracy by eliminating of influence of systematic error.

Keywords: expansion; thinning; stress; elastic deformations; accuracy; optimization; errors.

Комбинированную раздачу с растяжением (рис. 1) применяют для обеспечения при сборке точных размеров сопрягаемых деталей. В технической литературе и отраслевых стандартах до настоящего времени нет данных о достигаемой при выполнении этого процесса точности.

Однако при проектных работах необходимые данные могут быть получены путем расчетов с использованием результатов анализа напряженно-деформированного состояния и корректировки размеров инструмента на величину систематических погрешностей; возможна в некоторых случаях и корректировка технологического процесса для исключения влияния случайных погрешностей. Учитывая это и сохраняя единство анализа напряженно-деформированного состояния и формирования размеров при пластическом деформировании, будем ориентироваться на методику исследования, изложенную в работе В.Г. Ковалёва (О точности поперечных размеров при вытяжке с утонением // Вестник машиностроения. 1989. № 11. С. 142—146).

При комбинированной раздаче одновременно происходит растяжение и утонение материала деформированного участка заготовки. В процессе образования поперечных размеров основное влияние на точность размеров оказывает утонение образовавшейся после раздачи стенки заготовки. В этом случае, как и при комбинированной вытяжке, на входе и выходе из очага деформации действуют растягивающие напряжения.

При анализе также будем учитывать изменение напряжения текучести и толщины заготовки, возникающее при раздаче и комбинированной раздаче, а при расчете — изменение толщины стенки на основе исследований [1]. Так, осевое растягивающее напряжение при комбинированной раздаче на выходе из очага деформации равно:

$$\sigma_{zII} = \sigma_{sII}[\ln(s_0/s) + a[1 + (1 - s/s_0)\mu/2\sigma] + \\ + (1 - (s/s_0)](1 - \ln(s_0/s)\mu/\sigma + \mathrm{tg}\alpha/2],$$

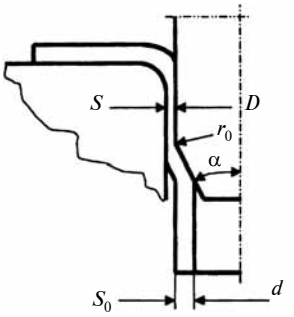


Рис. 1. Схема комбинированной раздачи с растяжением

где $\sigma_{sII} = \sigma_в[e\ln(s_0/s)/n]^n$ — напряжение текучести деформируемого при утонении материала с учетом упрочнения материала на выходе из очага деформации;

$\sigma_{в,n}$ — предел прочности и показатель упрочнения деформируемого материала;

e — основание натуральных логарифмов;

a — коэффициент, равный отношению σ_{sI}/σ_{zII}:

$$a = 1{,}1[(1 + \mu\mathrm{ctg}\alpha)\ln K + \\ + \sin\alpha\sqrt{s_0/d}]/[1 + \ln(Ks_n/s)/\ln(Ks_0/s_n)]_I;$$

$\sigma_{sI} = \sigma_в(e\ln K/n)^n$ — напряжение текучести материала заготовки при раздаче с растяжением (без утонения);

$\sigma_{\theta I} = \sigma_{sI}$ — окружное растягивающее напряжение раздачи;

$$\sigma_{zI} = \sigma_{sI}[(I + \mu\mathrm{ctg}\alpha)\ln K + \sin\alpha\sqrt{s_0/d}]$$

— осевое растягивающее напряжение раздачи с растяжением;

σ_ρ — нормальное напряжение в очаге деформации;

$K = D/d$ — коэффициент раздачи;

D, d — диаметр детали и заготовки соответственно;

s_0, s, s_n — толщина заготовки, толщина стенки детали и заготовки после раздачи соответственно:

$$s_n = \left(\frac{D}{d}\right)^{\frac{\sigma\rho - \sigma\theta}{\sigma\rho - 2\sigma\theta}} s_0,$$

здесь учтено влияние на толщину стенки детали упрочнения материала, трение, соотношение напряжений формоизменения заготовки, показатель степени определяется как средняя величина по всему очагу деформации;

μ — коэффициент трения;

α — угол конической части пуансона:

$$\alpha = 2\mathrm{arctg}\left[\sqrt{\frac{\mu}{2}\left(1 - 0{,}5\ln\left(\frac{s_0}{s}\right)\right)\left(1 - \frac{s}{s_0}\right)}\right].$$

Радиальные, сжимающие пуансон и растягивающие матрицу напряжения:

$$\sigma_\rho = \sigma_{zII} - 1{,}15\sigma_{sII}.$$

Окружные напряжения (для плоского напряженного состояния):

$$\sigma_\theta = (\sigma_{zII} + \sigma_\rho)/2.$$

Среди других соотношений, определяющих образование размеров, следующие:

— деформация разгрузки детали после утонения заготовки (считаем ее полной из-за отсутствия сдерживающих факторов):

$$\varepsilon = -(0{,}5 - \nu)(\sigma_{zII} + \sigma_{\rho})/E;$$

— полная деформация разгрузки пуансона:

$$\varepsilon_{п} = -[\chi(1 - \nu_{п})\sigma_{\theta} - \nu_{п}\sigma_{zII})/E_{п};$$

— максимальная упругая деформация увеличения диаметра детали до начала ее пластического растяжения при полной разгрузке пуансона:

$$\varepsilon_{д}^{у} = \varepsilon_{ф} + \varepsilon_{д},$$

где $\nu, \nu_{п}$ — коэффициент Пуассона материала детали и пуансона соответственно;

E, $E_{п}$ — модуль упругости 1-го рода материала детали и пуансона соответственно;

χ — коэффициент относительной длины нагруженного участка образующей пуансона;

$\varepsilon_{д}^{п} = \sigma_{sI}/E$ — упругая деформация детали после полной разгрузки при возможном ее пластическом растяжении в этом процессе;

— итоговая деформация разгрузки детали после снятия ее с пуансона:

$$\varepsilon_{д}^{0} = \varepsilon_{д}^{п} \quad \text{при} \quad \varepsilon_{п} - \varepsilon^{п} > 0;$$

$$\varepsilon_{ф} \quad \text{при} \quad \varepsilon_{п} - \varepsilon_{д}^{п} \leqslant 0;$$

— температурная деформация уменьшения диаметра детали после снятия ее с пуансона и охлаждения:

$$\varepsilon_{t} = \Delta D/D;$$

— рассеивание деформации разгрузки, определяемое непостоянством свойств материала детали и условий обработки:

$$f(\varepsilon) = \varepsilon_{д}^{0\max} - \varepsilon_{д}^{0\min};$$

— диаметр пуансона, позволяющий изготовлять детали заданного размера d (аналогично и для матрицы):

$$d_{п} = d/(1 - \varepsilon_{д})(1 - \varepsilon_{п})(1 - \varepsilon_{t}) \text{ при } \varepsilon_{п} - \varepsilon_{д}^{п} > 0;$$

$$d_{п} = d/(1 - \varepsilon_{ф})(1 - \varepsilon_{п})(1 - \varepsilon_{t}) \text{ при } \varepsilon_{п} - \varepsilon_{д}^{п} \leqslant 0 \text{ и } \varepsilon_{ф} > 0;$$

$$d_{п} = d/(1 - \varepsilon_{ф})(1 - \varepsilon_{п})(1 - \varepsilon_{t}) \text{ при } \varepsilon_{п} - \varepsilon_{д}^{п} \leqslant 0 \text{ и } \varepsilon_{ф} \leqslant 0;$$

— уменьшение диаметра детали, вызванное изменением температуры детали после ее охлаждения:

$$\Delta D_{t} = \gamma(t_{2} - t_{1})D = \varepsilon_{t}D; \quad \varepsilon_{t} = \gamma(t_{2} - t_{1}),$$

где γ — коэффициент линейного расширения штампуемого материала;

t_{2}, t_{1} — начальная и конечная температуры материала в процессе штамповки:

$$t_{2} - t_{1} = \beta\sigma_{sII}\ln(Ks_{0}/s)/(427c\rho),$$

где β — коэффициент выхода тепла;

ρ — плотность штампуемого материала;

c — теплоемкость материала в данном интервале температур.

Анализ представленных выражений для деформации разгрузки показал, что окружные деформации разгрузки $\varepsilon_{ф}$ в зависимости от степени утонения и других параметров процесса раздачи могут быть положительными, отрицательными и равными нулю; это дает возможность путем оптимизации степени утонения на всех операциях регулировать процесс таким образом, чтобы рассеивание деформации разгрузки после деформирования на последней операции было равно нулю. Однако это не всегда возможно, так как из-за особенностей схемы процесса не всегда можно получить нуль в числителе дроби, определяющей $\varepsilon_{ф}$.

Предлагаемая методика позволяет определить систематические погрешности, что позволяет заранее скорректировать размеры инструмента для изготовления более точных деталей с учетом процесса разгрузки (систематических и возможно случайных погрешностей).

Порядок вычислений для определения оптимальных размеров инструмента разработан с учетом изменения механических свойств обрабатываемого материала и условий формообразования (коэффициента трения). Поэтому предусмотрено определение оптимального угла конусности пуансона, при котором сила формообразования минимальна, и оптимальной степени утонения, при которой деформация разгрузки минимальна.

Алгоритм разработан применительно к возможности выполнения вычислений с использованием универсальной вычислительной системы математических расчетов MathCAD 15.0.

Алгоритм вычислений следующий: ввод исходных данных; организация N циклов вычислений; решение системы уравнений для определения осевого напряжения; определение производной от осевого напряжения; определение оптимального угла конусности пуансона, обеспечивающего минимальное осевое напряжение; решение системы уравнений при оптимальном значении силовых параметров для определения необходимых силовых и деформационных характеристик процесса; определение окончательной упругой деформации разгрузки в зависимости от наличия (9) или отсутствия (10) пластической деформации заготовки при разгрузке; определение интервала рассеивания деформации разгрузки из-за непостоянства

механических свойств обрабатываемого материала; определение условий образования размеров: при неравенстве нулю выделенной функции за оптимальную следует принимать минимальную степень утонения, а при равенстве нулю вычислить степень утонения, соответствующую наименьшему интервалу рассеивания деформации разгрузки; вычисление размеров формообразующего инструмента; построение кривых, характеризующих изменение основных силовых и деформационных параметров процесса образования размеров при раздаче с растяжением.

Расчеты выполнены для детали, изготовленной из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н9, имеющей следующие механические характеристики: предел прочности $\sigma_в$ = 550...620 МПа; модуль упругости 1-го рода E = 188 ГПа; коэффициент Пуассона ν = 0,27; показатель упрочнения n = 0,49; коэффициент линейного расширения α = 17, 10^{-6} 1/°С; удельную теплоемкость c = 0,1225 кДж/(кг · К); плотность ρ = 7,85 г/см^3.

Для материала пуансона приняты также на основе справочных данных следующие свойства: E = = 210 ГПа; ν = 0,3; начальная температура штампуемого материала 20 °С. Коэффициент трения μ = 0,05...0,35. При расчете во всех случаях принимали переменными предел прочности материала и коэффициент трения, т.е. непостоянство свойств штампуемого материала и условий процесса.

На рис. 2, *а* приведена зависимость растягивающего осевого напряжения раздачи от угла конусности пуансона; на этом рисунке ярко выражен минимум напряжения при определенном значении угла пуансона. Поэтому для всех последующих расчетов используем инструмент с оптимальным углом, соответствующим минимуму напряжения течения.

Из рис. 3 следует, что оптимальный угол — это угол, обеспечивающий минимальное напряжение и силу деформирования только при определенной степени утонения для выбранного материала; отклонение от его значения в большую или меньшую сторону приводит к увеличению напряжения и силы деформирования.

На рис. 3—7 представлены зависимости различных параметров процесса комбинированной раздачи с растяжением (осевого напряжения течения материала, угла конусности пуансона, повышения температуры деформируемого материала и окончательной разгрузки детали) от основных параметров процесса деформирования (степени утонения и коэффициента трения).

На рис. 3 показаны зависимости оптимального угла конусности матрицы от степени утонения для различных деформируемых материалов. Из рис. 3 следует , что деформируемый материал оказывает определенное влияние на угол конусности, поэтому требуется рассчитывать не только напряжение, необходимое для определения силовых параметров процесса и оборудования, но и геометрические параметры инструмента.

Общая характерная зависимость осевого напряжения пластического деформирования следующая: с увеличением степени утонения при пластическом деформировании и прочности обрабатываемого материала угол конусности пуансона повышается таким образом, что чем больше прочность и степень утонения, тем больше угол конусности пуансона.

Вторая особенность состоит в том, что каждый определяемый параметр представлен на рисунке

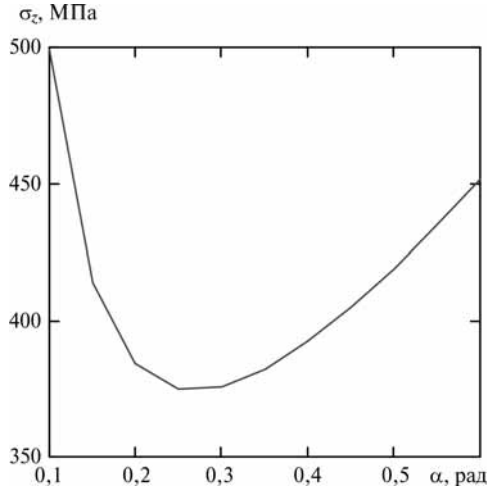


Рис. 2. Зависимость растягивающего осевого напряжения комбинированной раздачи от угла конусности пуансона при μ = 0,05

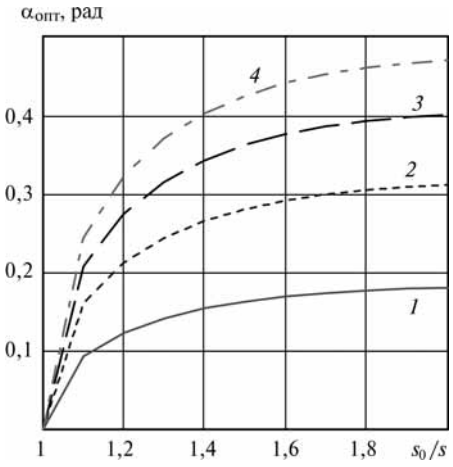


Рис. 3. Зависимости оптимального угла конусности пуансона от степени утонения при μ = 0,05 для различных материалов:
1 — сталь 12Х18Н9Т; *2* — латунь Л63; *3* — бериллиевая бронза БрБ2; *4* — сталь 20

двумя кривыми, определяющими максимальную и минимальную его величину, а промежуток между ними показывает рассеивание определяемого параметра (осевого напряжения, оптимального угла конусности пуансона, изменения температуры, деформации разгрузки) в зависимости от степени утонения и коэффициента трения.

Осевое растягивающее напряжение существенно зависит как от степени утонения (рис. 4, *а*), так и от коэффициента трения (рис. 4, *б*): с их увеличением оно возрастает.

На рис. 5 в дополнение к рис. 2 показаны расчетные зависимости оптимального угла конусности пуансона от степени утонения и коэффициента трения. Отметим, что трение значительно влияет на угол конусности.

На рис. 6 приведены расчетные кривые изменения температуры от степени утонения и коэффициента трения. Отмечена значительная температурная зависимость деформации детали от степени утонения, которая, как и увеличение температуры, прямо пропорциональна степени утонения в выбранном интервале изменяющихся параметров. Из графиков следует: температура материала в очаге деформации существенно повышается, в зависимости от степени утонения и от коэффициента трения, при этом характер зависимости — почти прямолинейный.

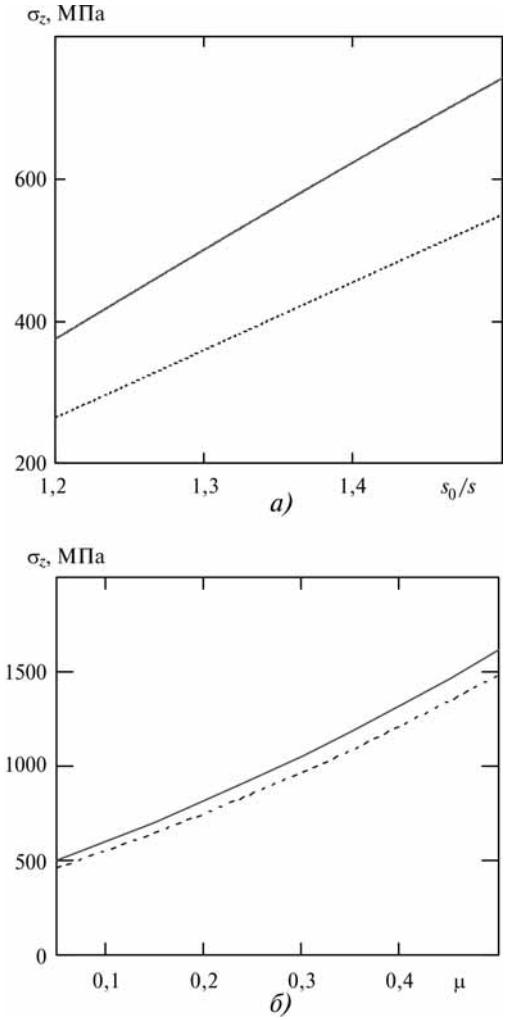


Рис. 4. Осевое растягивающее напряжение течения материла и его рассеивание в зависимости от степени утонения (*а*) и коэффициента трения (*б*)

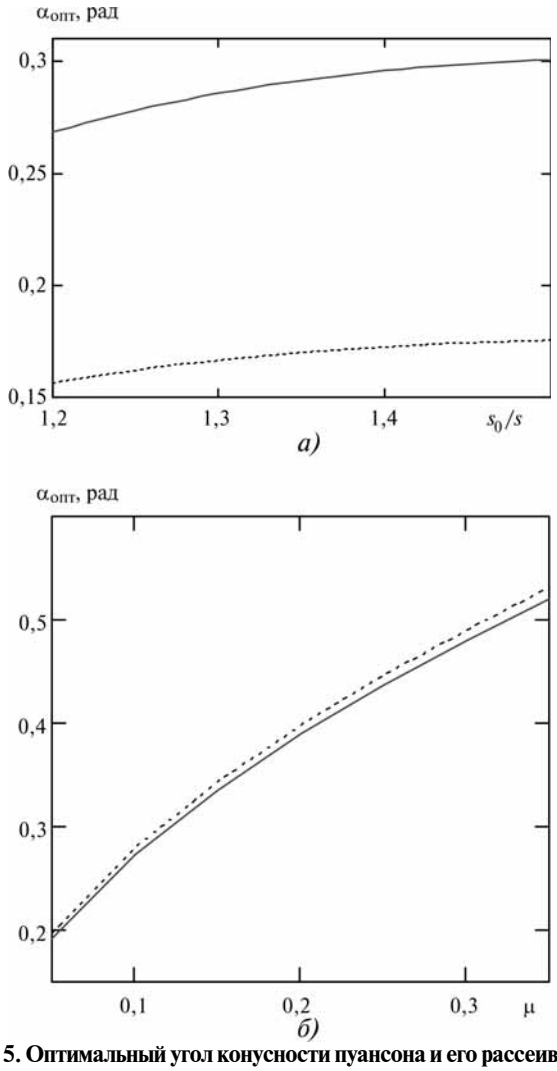


Рис. 5. Оптимальный угол конусности пуансона и его рассеивание в зависимости от степени утонения (*а*) и коэффициента трения (*б*)

Возможная пластическая деформация детали, которая может возникнуть при разгрузке инструмента (пуансона), также увеличивается практически прямо пропорционально степени утонения. Предельная упругая деформация разгрузки детали почти прямо пропорциональна степени утонения.

На рис. 7 приведены зависимости окончательной деформации разгрузки и ее рассеивания от степени утонения и коэффициента трения. Отрезок линии от оси абсцисс до нижней расчетной линии определяет минимальное отклонение размера, а от-

резок до верхней линии — максимальное отклонение размера от заданной величины. Расстояние между верхней и нижней расчетной линией определяет рассеивание деформации разгрузки.

Произведение диаметра элемента изготовляемой детали на деформацию определяет точность ее изготовления. Первые два отрезка определяют допуск (минимальный и максимальный) на получаемый элемент детали. При размерной оптимизации для изготовления более точных деталей корректируют размер инструмента так, чтобы отрезок упругой деформации детали не влиял на требуемый фактический размер детали готовой детали, т.е. при разгрузке с уменьшением диаметра изделия пуансон и матрицу увеличивают на эту величину и наоборот. В этом случае точность диаметрального размера будет определяться рассеиванием размера, определяемого расстоянием между двумя расчетными линиями.

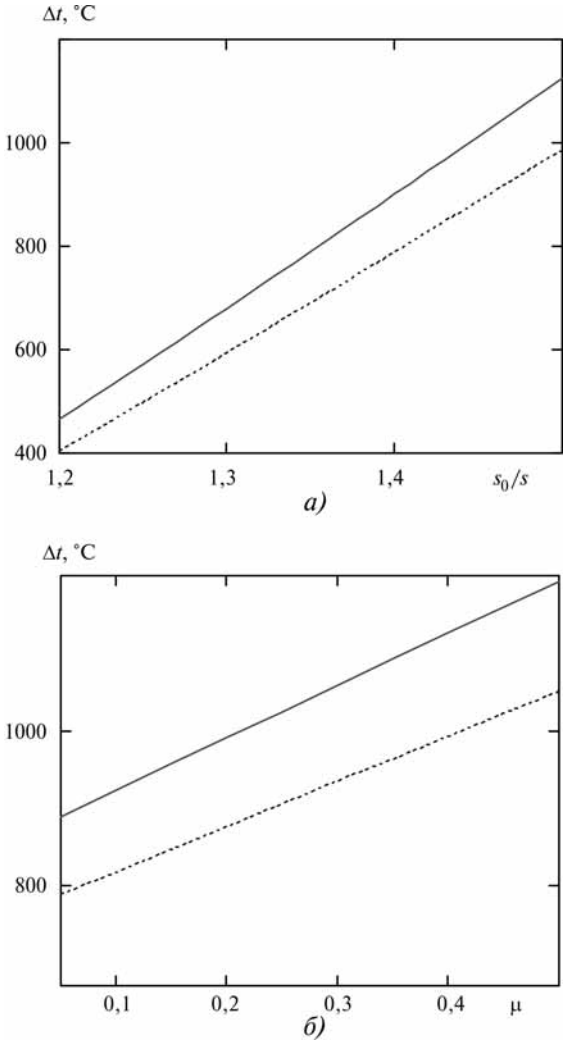


Рис. 6. Изменение и рассеивание температуры в очаге деформации в зависимости от степени утонения (*а*) и коэффициента трения (*б*)

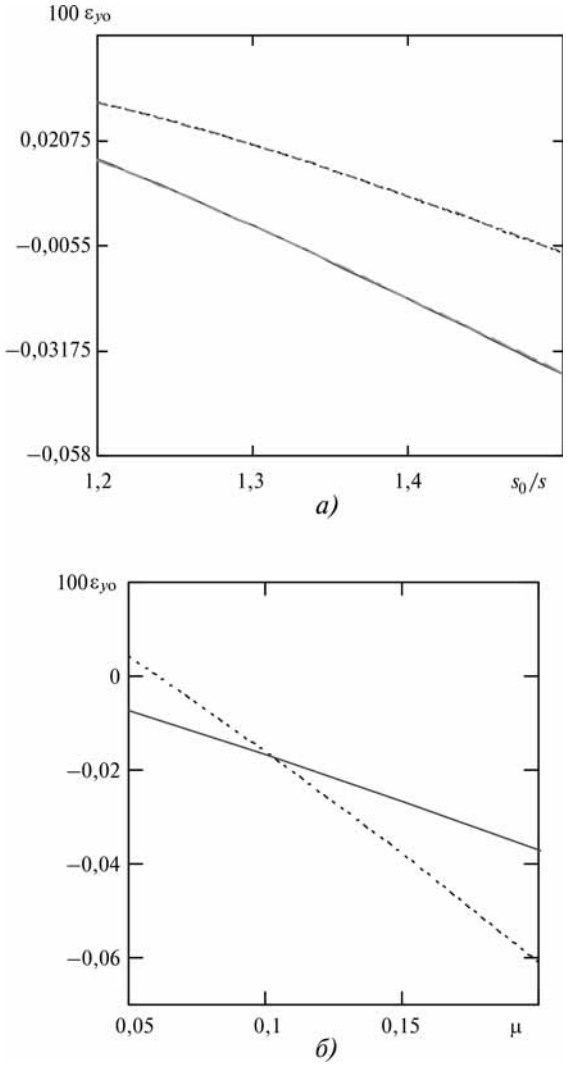


Рис. 7. Изменение и рассеивание окончательной деформации разгрузки в зависимости от степени утонения (*а*) и коэффициента трения (*б*)

При благоприятном соотношении осевого растягивающего и окружного сжимающего напряжения (см. рис. 7, *б*) расстояние между этими линиями равно нулю при некоторой деформации. В таком случае рассеивание размера детали при стабильном сохранении свойств и условий процесса деформирования и будет равно нулю, а размеры детали не будут в некоторых случаях отличаться от размеров инструмента. Задача обеспечения максимальной точности сводится к созданию благоприятного напряженно-деформированного состояния и корректировке исполнительных размеров инструмента.

На рис. 7, *а* показана окончательная упругая деформация разгрузки детали в зависимости от степени утонения, которая является результатом сложного взаимодействия заготовки с инструмен-

том в процессе формообразования и разгрузки инструмента и детали при обычной технологии, т.е. после снятия детали с пуансона.

Кривые на рис. 7, *б* характеризуются тем, что линии разгрузки пересекаются в некоторой точке (точке оптимальной степени деформации), где рассеивание деформации разгрузки равно нулю; эта точка определяется соответствующей степенью утонения.

Предлагаемая методика определения деформации разгрузки и полученные при расчете результаты позволяют определить согласованные оптимальные параметры силового процесса и процесса разгрузки при образовании размеров детали. Все это увеличивает точность штампуемых деталей до 3—4-го квалитета и износостойкость инструмента при отсутствии повышенных требований к точности изделия (или одновременно частично повышает точность и износостойкость инструмента).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Попов Е.А., Ковалёв В.Г., Шубин И.Н.** Технология и автоматизация листовой штамповки. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 475 с.

Виктор Григорьевич Ковалёв, д-р техн. наук,
kvg@bmstu.ru

УДК 621.77

Ю.А. Лавриненко *(ФГУП "НАМИ", Москва),*
Марк Ван Тиль (*Nedschroef Herentals N.V., Бельгия)*

Гибридные многопозиционные автоматы для холодной объемной штамповки

Приведены сведения о новом прогрессивном направлении в проектировании гибридных многопозиционных автоматов для холодной объемной штамповки с применением сервотехнологии и в частности – данные по использованию данной технологии в механизмах переноса и подачи заготовок в многопозиционных холодновысадочных автоматах.

Ключевые слова: кузнечно-штамповочное оборудование; многопозиционные холодновысадочные автоматы; сервотехнологии; гибридные системы.

New progressive trend of developing and design of hybrid multistation metal forming machines with servo technology is presented. Some data of using this technology for transfer and feed of devices in multistation metal forming machines are shown.

Keywords: press forging equipment; multistation metal forming machines; servo technologies; hybrid systems.

Компанией Nedschroef Herentals N.V. (Бельгия) успешно развивается новое прогрессивное направление в проектировании гибридных многопозиционных холодновысадочных автоматов для изготовления крепежных и других сложнопрофильных деталей. При этом обычную кинематическую схему автомата комбинируют с технологией NC (числовое программное управление), или сервотехнологией.

В настоящее время применяют в производстве многопозиционные холодновысадочные автоматы компании Nedschroef Herentals N.V. с механизмом переноса и механизмом подачи заготовок с сервоприводом с числовым программным управлением.

Использование сервотехнологии позволяет повысить производительность гибридных холодновысадочных автоматов, а также проводить контроль и наблюдение за технологическим процессом штамповки, что в обычных автоматах было невозможно или затруднительно.

Сущность сервотехнологии заключается в том, что исполнительное устройство (например, сервомотор или гидравлический цилиндр) выполняет требуемое движение в соответствии с управляющим воздействием другого технического устройства (например, NC-контроллера). При этом достижение заданной величины происходит в закрытом контуре регулирования.

Управляющее воздействие (например, число оборотов), соответствующее алгоритму регулирования, изменяется посредством постоянного сравнения требуемого и фактического значения (например, положения). При этом настройка соответствующих параметров регулирования должна обеспечивать минимальную разницу между требу-

емой и фактической величиной при сохранении стабильного контура регулирования.

Электрический сервопривод состоит из сервомотора (ротационного или линейного) и измерительной системы, серворегулятора, а также системы числового программного управления.

Современные сервомоторы – это необслуживаемые двигатели трехфазного тока с интегрированным датчиком положения, который служит одновременно для регистрации положения ротора, числа оборотов и позиционирования. В настоящее время все большее применение находят датчики с магнитным принципом воспроизведения вместо оптического.

Современные серворегуляторы – это преобразователи частоты с модулированным пульсирующим выходом трехфазного тока. Интегрированные цифровые контуры регулирования тока, числа оборотов и положения обеспечивают работу в цикле до 16000 раз в секунду.

Числовое программное управление (NC-управление) обеспечивает контроль движения интегрировано через серворегулятор и выполняется через соответствующий контроллер (PLC) или компьютерное управление (IPC).

Сервотехнологии успешно применяют для управления механизмом переноса многопозиционных холодновысадочных автоматов.

Механизм переноса с числовым программным управлением состоит из транспортных цанг, приводимых в действие сервомоторами и суппорта переноса, приводимого в действие также сервомотором (рис. 1).

Процесс движения переноса относительно движения ползуна в результате числового программного управления всегда остается постоянно синхронизированным с углом поворота коленчатого вала как ведущей осью, независимо от числа ходов автомата.

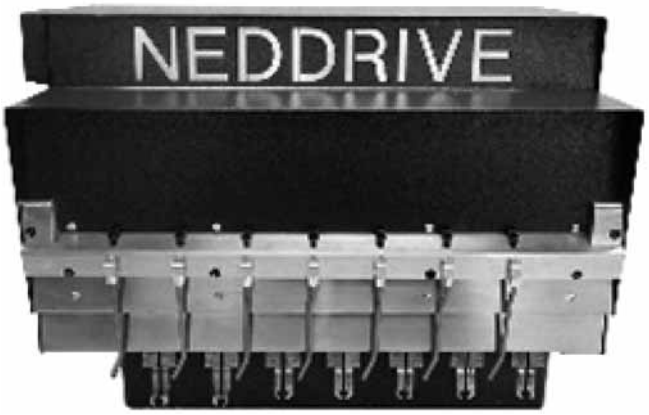


Рис. 1. Механизм переноса с сервоприводом и числовым программным управлением

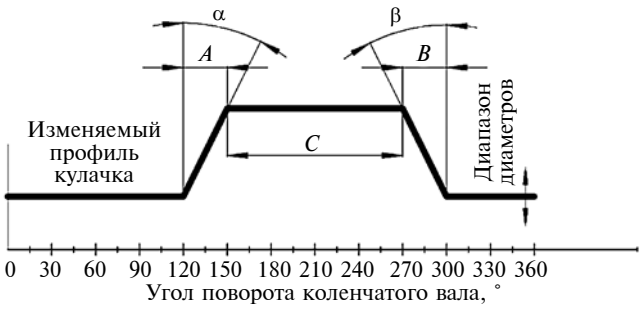


Рис. 2. Возможности настроек движения механизма переноса с NC-управлением:

α, β, *A*, *B* – углы и ход открытия, закрытия пары пальцев; *C* – выдержка в открытом состоянии

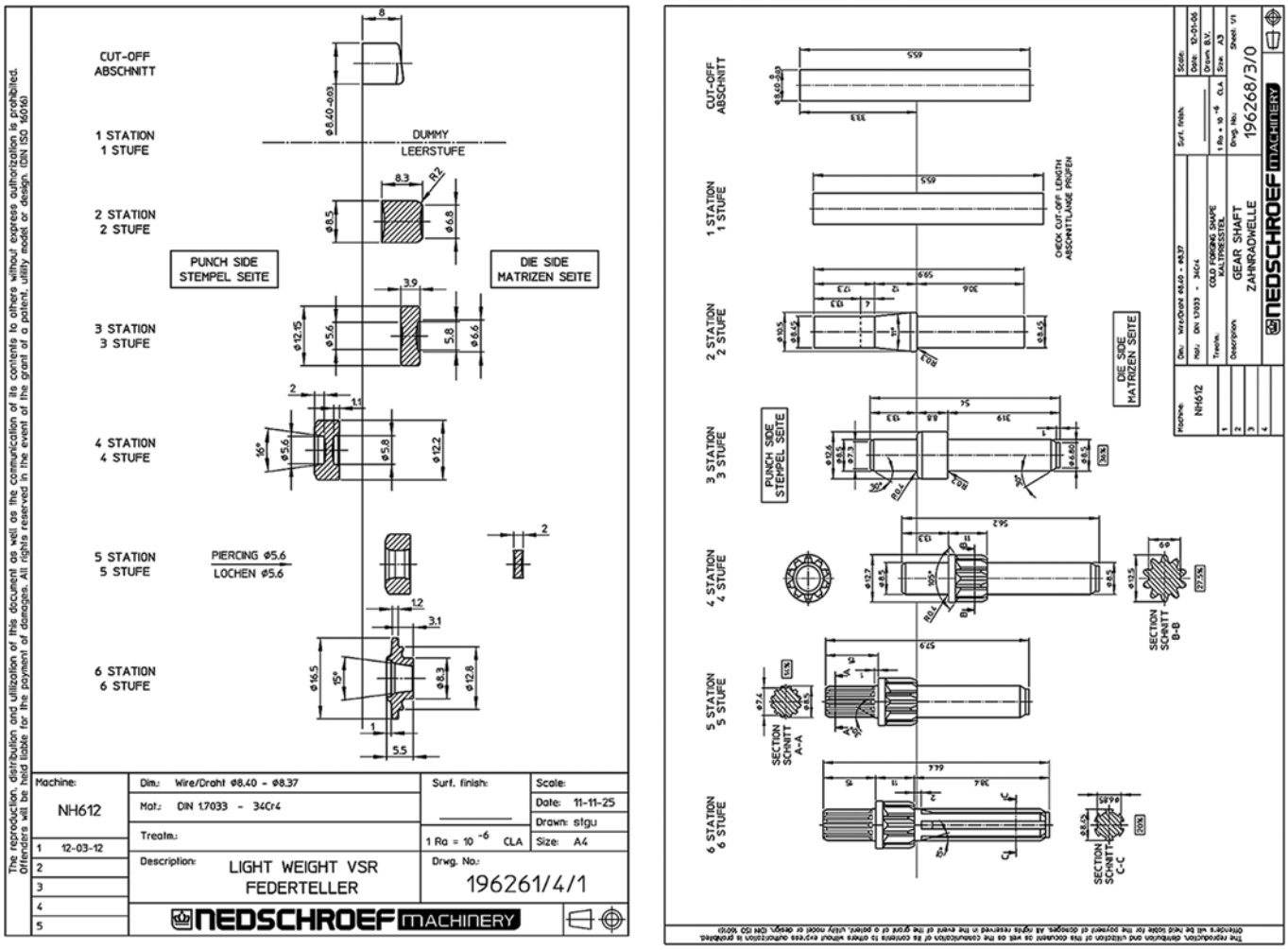
Мастер (контроллер движения) задает профиль (форму кривых) с ритмичностью 0,5...1 мс, и исполнитель (сервомеханизм) следует за этим заданным профилем. При этом контуры регулирования регулируют в течение доли миллисекунд ток, скорость и положение по описанному выше способу. За счет специальной новой кинематики цанги открываются и двигаются выше максимального диаметра пуансона, соответствующего 90 % диаметра матриц, причем в начальный момент открытия центр захватов не изменяет своего положения.

Таким образом, с одним и тем же комплектом пальцев переноса без механического изменения настроек можно охватить диапазон диаметров, отличающихся в 2 раза. Это позволяет транспортировать отличающиеся по длине изделия теми же самыми пальцами переноса. На рис. 2 показаны возможности настроек движения механизма переноса с NC-управлением.

Благодаря комбинации механики и сервопривода механизм переноса с NC-управлением изменение момента времени (начало открытия, конец закрытия) и процесса движения в целом (наклон кривой) отдельных движений цанг и поперечного движения задают только путем программирования, без механических переустановок или изменения кулачков. Таким образом, исключена требующая времени настройка управляющих кулачков, что снижает общее время настойки механизма переноса. Кроме того, эти настройки более точные и их воспроизводимость не зависит от оператора.

Применение механизма переноса с сервоприводом обеспечивает также следующие преимущества:

- изменение диаметра захвата (закрытое положение пальцев) и силы зажима достигается только программированием;
- быстрое движение пальцев и поперечное движение суппорта переноса, вследствие чего до-



а) *б)*

Рис. 3. Технологические переходы штамповки тарелки пружины клапана (*а*) и зубчатой оси (*б*)

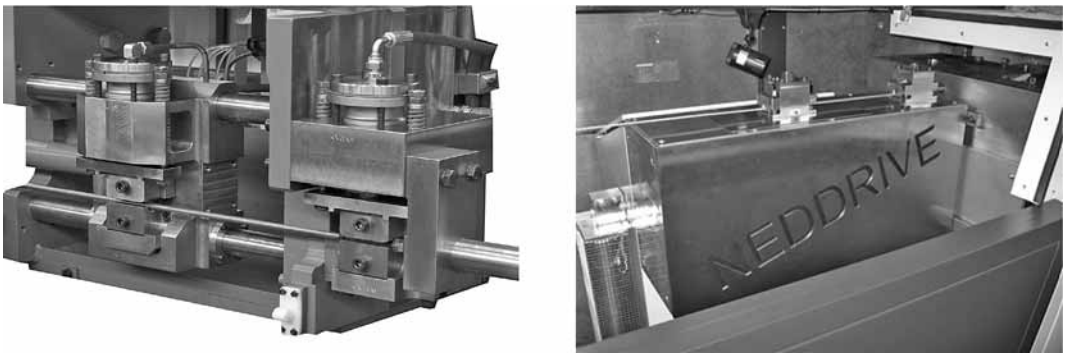
стигаются упрощение конструкции инструментов и возможность захвата пальцами очень коротких деталей непосредственно из пуансона (вместо поворотной цанги);

- исключение несанкционированного выпадения отдельных или всех заготовок по переходам;
- простой контроль захвата (диаметр захвата, сила зажима) и контроль поперечного движения без дополнительных датчиков, только с использованием уже имеющихся в сервоуправлении сведениями о положении и силе;
- при обнаружении ошибки пальцы могут полностью очень быстро отойти обратно (в пределах 25 мс);
- снижение затрат на инструмент за счет дополнительного контроля;
- простота перемещения суппорта вследствие отсутствия механических связей привода механизма переноса с прессом.

На рис. 3 показаны примеры технологических переходов штамповки тарелки пружины клапана и зубчатой оси на одном многопозиционном холодновысадочном автомате. При использовании механизма переноса с механическим приводом от автомата с одинаковой кинематикой было невозможно обеспечить захват и перенос заготовки тарелки пружины клапана и заготовки зубчатой оси, так как заготовки имеют различную длину.

Механизм переноса с NC-управлением может захватывать и переносить заготовки обеих деталей без использования дополнительных поддерживающих цанг. При переналадке с помощью контроллера управления загружаются другие электронные профили кулачков, благодаря чему сервопривод обеспечивает другую кинематику движения суппорта.

Таким образом, применение сервоприводов в механизме переноса многопозиционных холодно-



а) *б)*

Рис. 4. Линейная подача проволоки с механическим приводом (*а*) и приводом с линейным сервомотором с NC-управлением (*б*)

высадочных автоматов позволяет расширить возможности штамповки различных деталей.

Компания Nedschroef Herentals N.V. впервые в мире в 1984 г. разработала и использовала в конструкции многопозиционных холодновысадочных автоматов механическую линейную подачу проволоки, обеспечивающую чистую поверхность проволоки без повреждений и постоянство объема заготовки (рис. 4, *а*).

В дальнейшем использование сервотехнологии обеспечило возможность подачи проволоки прямыми линейными сервомоторами (рис. 4, *б*).

Преимуществами линейной подачи, приводимой в действие сервомотором, по сравнению с механической линейной подачей являются:

- изменение длины подачи от 0 до максимальной длины заготовки без механических переустановок, только путем задания в NC-управлении абсолютной длины заготовки с точностью 0,01 мм;
- возможность корректировки длины заготовки во время работы автомата;
- очередность выполнения параметров настроек реализуются за счет программного обеспечения, так как отсутствует механическая связь между суппортом механизма переноса и приводом автомата;
- обеспечение незначительных колебаний длины отрезаемой заготовки.

Применение линейной подачи с NC-управлением позволяет корректировать длину отрезаемой заготовки в автоматическом режиме, что является важным для штамповки точных фасонных деталей, а также обеспечивает повторяемость величины подачи и длины заготовки, что снижает время переналадки.

С 2011 г. компанией Nedschroef Herentals N.V. построено около 10 гибридных многопозиционных холодновысадочных автоматов, которые находятся в эксплуатации.

Современные сервотехнологии предлагают дополнительные возможности для повышения эффективности использования многопозиционных автоматов для холодной объемной штамповки: улучшение возможностей штамповки сложных деталей, быстрая переналадка, удобство обслуживания автоматов и гибкость их использования, перспективность применения гибридных машин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Лавриненко Ю.А., Евсюков С.А., Лавриненко В.Ю.** Объемная штамповка на автоматах. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 259 с.
2. **http:// www.nedschroef.be**

Юрий Андреевич Лавриненко, канд. техн. наук,
lavrinenko52@mail.ru;
Марк Ван Тиль

УДК 669.017:621.7

К.Б. Лабер, Х.С. Дыя, А.М. Кавалек
(Ченстоховский технологический университет, г. Ченстохова, Польша)

Анализ процесса многоуровневого охлаждения полосы при прокатке катанки диаметром 5,5 мм из стали для холодной осадки в блоке Моргана*

Выполнен анализ параметров многоуровневого контролируемого охлаждения полосы в процессе прокатки катанки диаметром 5,5 мм из стали для холодной осадки 20MnB4. Определена эффективность управления температурой полосы в блоке Моргана при заданных параметрах охлаждения.

Ключевые слова: прокатка катанки; сталь для холодной осадки; параметры пластической деформации; микроструктура; механические свойства.

The analysis of parameters of multilevel controlled cooling of strip during rolling of wire rod with diameter of 5,5 mm from cold upsetting steel 20MnB4 is carried out. Management efficiency effect of strip temperature in Morgan's block is defined at the set parameters of cooling.

Keywords: rolling of wire rod; steel for cold upsetting; plastic deformation parameters; microstructure; mechanical properties.

Введение. Повышенный спрос потребителей к катанке способствует развитию новых технологий, обеспечивающих повышение качества готовых изделий и снижение стоимости продукции, в том числе за счет совершенствования конструкции устройств и измерительных систем прокатных цехов [1].

Для удовлетворения требований потребителей в современных прокатных цехах должны применяться надежные технологии и оборудование для управления технологическим процессом путем комплексного проектирования всех его элементов, начиная от установок и систем контроля до мест отгрузки готовых изделий.

В настоящее время проектируют прокатные цеха с одной или двумя технологическими линиями, которые позволяют проводить термомеханическую обработку, нормализацию, ускоренное охлаждение и закалку. Полное описание такого типа прокатных цехов приведено в работе [1].

Авторы [2] считают, что множество существующих технологических линий и применяемые для них режимы обработки в настоящее время не позволяют изготовлять катанку, отвечающую растущим требованиям потребителей по уровню и стабильности механических свойств, т.е. конкурентоспособную на мировом рынке продукцию. Принимая во внимание постоянно возрастающие требования заказчиков, следует стремиться к постоянному улучшению технологических процессов для того, чтобы свойства производимой катанки были на высоком уровне.

Одним из самых важных параметров процесса прокатки является температура деформируемой полосы. Точное управление распределением температуры в материале во время всех этапов процесса прокатки позволяет получать продукцию с заданной микроструктурой и механическими свойствами, что подтверждают результаты исследований в работах [3–6].

На распределение температуры в полосе в процессе прокатки влияет множество факторов, в частности обжатия в каждом проходе, условия теплообмена и способы ее охлаждения в разных установках. Определение условий и параметров теплообмена, а также температуры полосы на этапах процесса прокатки является актуальной и сложной проблемой, связанной с различными условиями охлаждения и неравномерностью деформаций по объему полосы [7].

*Работа выполнена при финансовой поддержке Национального Центра Исследований и Развития в 2013—2016 по Проекту Прикладных Исследований № PBS2/A5/0/2013.

1. Фактический химический состав исследованной стали 20MnB4, % мас.

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Mo	Sn
0,21	0,97	0,10	0,014	0,009	0,26	0,07	0,17	0,024	0,014	0,012
N	Pb	Al_{met}	Ca	As	Cb	V	Ti	B	Zn	C_{eq}
0,0119	0,001	0,020	0,002	0,007	0,002	0,004	0,047	0,0030	0,018	0,44

Примечание. Al_{met} — количество алюминия, находящегося в сплаве в твердом растворе; C_{eq} — углеродный эквивалент свариваемых сталей.

Целью работы является изучение условий охлаждения материала при прокатке, а также анализ их влияния на распределение температуры, микроструктуру и свойства готового изделия – катанки из стали 20MnB4.

Методика проведения исследований. Анализ параметров многоуровневого контролируемого охлаждения полосы при прокатке катанки диаметром 5,5 мм из стали для холодной осадки 20MnB4 [8] проводили применительно к технологическим условиям одного из прокатных цехов. Химический состав исследуемой стали по заводским данным приведен в табл. 1.

Анализировали также расход потока охлаждающей жидкости и ее давление в устройствах для ускоренного и контролируемого охлаждения при прокатке. Изучали влияние условий охлаждения на распределение температуры прокатываемого материала.

Прокатный цех, в котором проводили исследования, позволяет осуществлять прокатку с большими скоростями, составляющими примерно 105 м/с при прокатке катанки из стали 20MnB4 диаметром 5,5 мм. Прокатный цех оборудован установками для охлаждения полосы водным распылением непосредственно на прокатной линии стана.

Первая зона охлаждения состоит из трех охлаждающих камер и расположена после черновой клети среднего непрерывного стана. Задачей этой зоны является охлаждение полосы перед входом в десятиклетьевой прокатный блок NTM (NO-TWIST MILL), в котором в результате интенсивной пластической деформации температура полосы значительно повышается.

Следующая зона охлаждения, состоящая из двух охлаждающих камер, расположенных за черновым блоком NTM, служит для снижения температуры полосы перед последующим этапом прокатки в четырехклетьевом чистовом блоке RSM (REDUCING SIZING MILL).

Между блоком RSM и устройством для сматывания катанки в бунты находится третья зона охлаждения, состоящая из трех охлаждающих камер. Все устройства для охлаждения водным распылением оборудованы индивидуальным контроллером и позволяют изменять условия теплообмена в широком диапазоне.

Линия прокатного стана заканчивается холодильной установкой SELMOR, которая позволяет регулировать процесс охлаждения в зависимости от заданных свойств готовой катанки. Регулируемое водное охлаждение на технологической линии, управление системой охлаждения воздухом путем изменения протяженности зоны обдува на рольганге STELMOR, а также плавное регулирование объема поступающего воздуха позволяют управлять микроструктурой и свойствами изготовляемой катанки в широком диапазоне.

Общая схема расположения установок в анализируемом цехе представлена на рис. 1. Система ускоренного и контролируемого охлаждения спроектирована таким образом, что последующие охлаждающие секции в каждой камере включаются автоматически в момент достижения давления 0,25 МПа (2,5 бар) в уже открытых и работающих соплах. В связи с этим, в зависимости от давления воды, подаваемой непосредственно в сопла, установленные в каждой охлаждающей секции, изменяется протяженность временных отрезков, на которых полоса ускоренно охлаждается, а также общее время ее охлаждения.

Результаты исследований и их обсуждение. Для анализа параметров многоуровневого контролируемого охлаждения полосы в процессе прокатки катанки диаметром 5,5 мм из стали 20MnB4 применяли программное обеспечение, установленное в цехе, которое позволяет регистрировать все параметры процесса. Температурные данные, полученные при измерениях в реальном процессе прокатки, сравнивали с данными, полученными в результате математического моделирования.

На рис. 2 представлен фрагмент диалогового окна системы мониторинга и управления параметрами процесса ускоренного охлаждения.

Изменения температуры поверхности полосы, давления и расхода потока охлаждающей жидкости

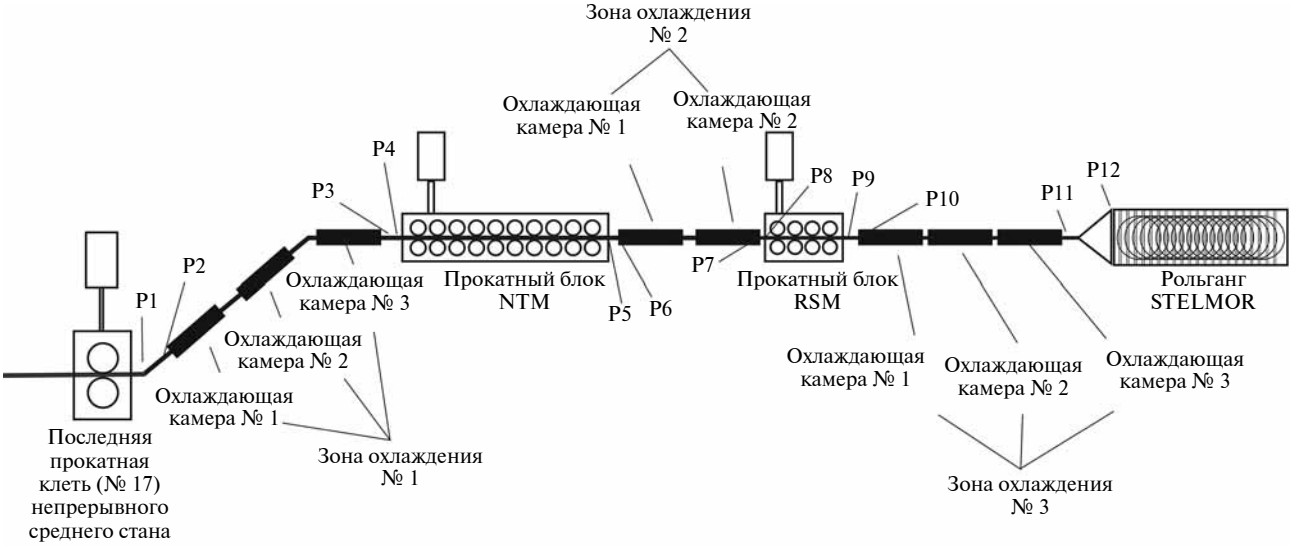


Рис. 1. Общая схема расположения установок в анализируемом прокатном цехе:
P1–P12 – места измерения температуры прокатываемой полосы

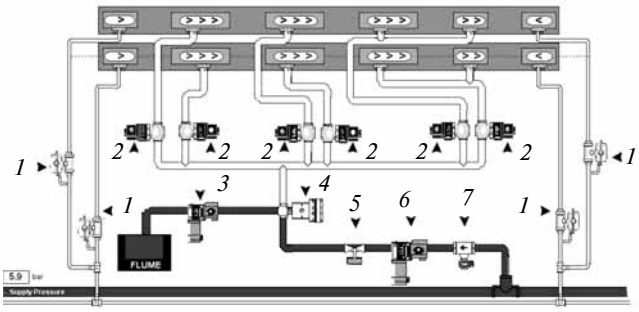


Рис. 2. Фрагмент диалогового окна системы мониторинга и управления параметрами процесса ускоренного охлаждения:
1 – воздушные сопла для отвода воды; *2* – второстепенные клапаны для подвода воды к каждой секции; *3* – модульный клапан канала; *4* – главный клапан подвода воды к охлаждающей камере; *5* – передатчик давления; *6* – модульный клапан охлаждения; *7* – передатчик потоков

в зоне охлаждения № 1 представлены на рис. 3–5.

Точные значения анализируемых параметров процесса ускоренного охлаждения в каждой зоне охлаждения приведены в табл. 2.

Анализ данных, представленных на рис. 3–5 и в табл. 2, показал, что в процессе прокатки катанки из стали 20MnB4 диаметром 5,5 мм в зонах охлаждения № 1 и № 3 работает только первая охлаждающая камера, в зоне охлаждения № 2 работают обе охлаждающие камеры.

Как следует из полученных результатов измерений, установленные в прокатном цехе устройства для ускоренного охлаждения полосы не работали с максимальной производительностью. В анализируемом случае две из трех зон (№ 1 и № 3) использовались лишь частично.

В табл. 3 приведены точные значения температуры поверхности полосы при ее прохождении через каждое устройство прокатного стана, а также – значения расхождения между данными, полученными в результате математического моделирования и измеренными с помощью тепловизионной камеры ThermaCAM SC640. Представленные данные относятся только к прокатке катанки в блоке Моргана, для которого в качестве садки использовали пруток со среднего непрерывного стана (прокатной клети

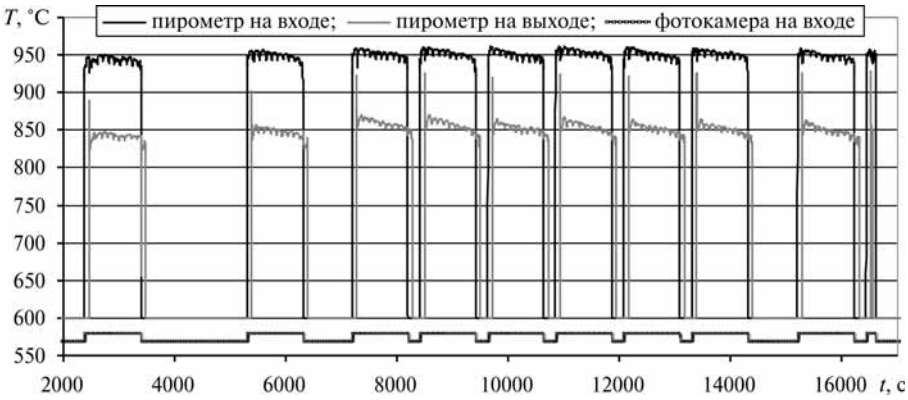


Рис. 3. Изменение температуры *T* поверхности полосы в зоне охлаждения № 1

2. Параметры процесса многоуровневого охлаждения полосы при прокатке катанки диаметром 5,5 мм из стали 20MnB4 в блоке Моргана

Параметр	Зона охлаждения							
	1			2		3		
	Охлаждающая камера							
	1	2	3	1	2	1	2	3
Давление, МПа (бар)	0,558 (5,58)			0,528 (5,28)		0,583 (5,83)		
	0,304 (3,04)	0 (0)	0,002 (0,02)	0,525 (5,25)	0,139 (1,39)	0,124 (1,24)	0,023 (0,23)	0,007 (0,07)
Расход потока, л/мин	1605,03	0,22	10,77	1722,16	425,24	617,03	1,50	0,15
Средняя температура поверхности полосы, °С: вход	952,68 (Р2)			985,50 (Р6)		791,69 (Р10)		
выход	852,57 (Р3)			797,82 (Р7)		739,54 (Р11)		

Примечание. Р2, Р3, Р6, Р7, Р10, Р11 — места измерений температуры полосы согласно рис. 1.

№ 17). Результаты распределения температуры полосы во всем процессе прокатки являлись предметом анализа предыдущих работ авторов данной статьи [9, 10].

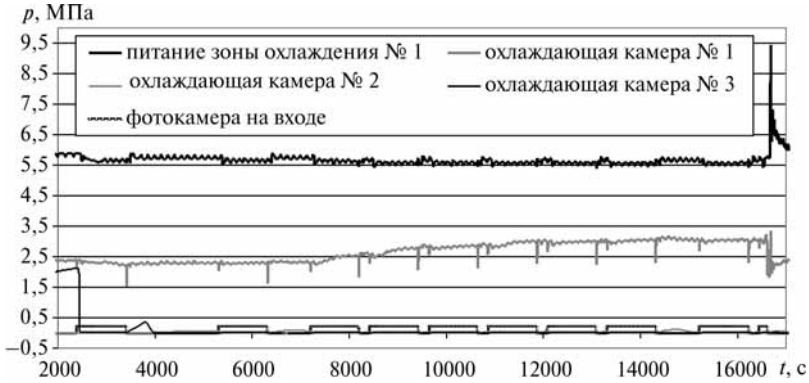


Рис. 4. Изменение давления *p* воды в зоне охлаждения № 1

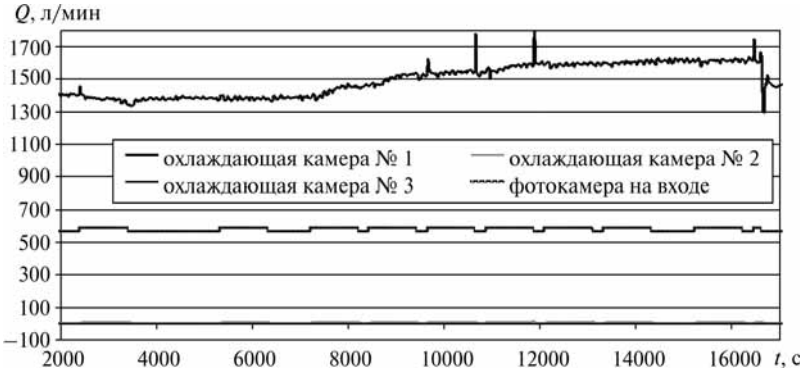


Рис. 5. Изменение расхода *Q* потока воды в зоне охлаждения № 1

Ввиду того, что прокатные клети (NTM и RSM) блока Моргана закрыты, в табл. 3 приведены только данные на входе и выходе из каждой прокатной группы (блока) стана (NTM и RSM).

На основании результатов измерений можно заключить, что средняя температура поверхности катанки на входе рольганга STELMOR составила 750 °С.

Необходимо отметить, что охлаждение анализируемой марки стали на линии STELMOR происходило при опущенных защитных экранах и включенных вентиляторах.

Из результатов работы [10] следует, что изготовленная таким образом катанка диаметром 5,5 мм из стали 20MnB4 имеет перлито-ферритную структуру, а средний размер зерна феррита в поперечном сечении готового изделия составляет 20 мкм. Кроме того, такая катанка характеризовалась полосчатой микроструктурой, в которой феррит и перлит формируют в чередующиеся полосы.

Применяемая в настоящее время технология прокатки катанки из стали для холодной осадки обеспечивает получение изделия с требуемым уровнем пластичности только в диапазоне обжатий до 33 % относительной пластической деформации [10]. При более высоких значениях деформации в материале появляются трещины, что исключает дальнейшую его обработку. В связи с этим катанка из стали 20MnB4 не отвечает требованиям действующих норм в области способности к дальнейшей пластической деформации.

3. Рассчитанные и измеренные значения температуры полосы в прокатных клетях

Номер клети	Форма калибра	$T_{ср}$, °C		$T_п$, °C		$T_р$, °C		Ошибка δ, %	
		перед клетью	за клетью	перед клетью	за клетью	перед клетью	за клетью	перед клетью	за клетью
Средний непрерывный прокатный стан									
17	Окружность	1092	1093	1068	1074 (P1)	—	1040 (P1)	—	3,27
Морган NTM									
19	Овал (вход)	921	925	872 (P4)	890	840 (P4)	—	3,81	—
28	Окружность (выход)	1010	1015	990	995 (P5)	—	950 (P5)	—	4,74
Морган RSM									
29	Овал (вход)	770	782	734 (P8)	754	780 (P8)	—	5,9	—
32	Окружность (выход)	810	799	781	781 (P9)	—	—	—	—

Примечание. P1, P4, P5, P8, P9 — места измерения температуры полосы согласно рис. 1.
Обозначения: $T_{ср}$, $T_п$ — рассчитанная средняя температура полосы и боковой поверхности полосы соответственно; $T_р$ — температура боковой поверхности полосы, измеренная при реальном процессе прокатки.

Выводы

1. Изготовляемая по современной технологии катанка из стали 20MnB4 имеет полосчатую перлито-ферритную структуру, которая негативно влияет на пластические свойства готового изделия. Вероятной причиной возникновения полосчатости структуры является слишком медленное охлаждение катанки. Для уменьшения полосчатости в катанке следует увеличивать скорость охлаждения полосы, уменьшая время возможной диффузии углерода.

2. При применении современной технологии прокатки катанка из стали 20MnB4 может подвергаться холодной пластической деформации при относительных деформациях готовых изделий не более 33 %. При более высоких значениях пластической деформации в материале появляются трещины, которые исключают его дальнейшую обработку.

3. Исследование температурного режима процесса прокатки катанки из стали 20MnB4 показало, что промышленные расширенные системы ускоренного и контролируемого охлаждения полосы используются не достаточно эффективно. Так, только в зоне охлаждения № 2, установленной между прокатными блоками NTM и RSM, охлаждающие установки работали полностью. В остальных зонах охлаждения (№ 1 – перед входом в блок NTM и № 3 – за блоком RSM) установки для охлаждения полосы полностью не задействуются: в обеих зонах охлаждения используется только одна охлаждающая камера.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Grosman F., Woźniak D.** Nowoczesne walcowanie walcówki // Hutnik Wiadomości Hutnicze. 2001. № 3. P. 97–104.

2. **Grosman F., Woźniak D.** Technologiczne aspekty walcowania walcówki z nowoczesnych stali // Hutnik-Wiadomości Hutnicze. 2002. № 11. P. 408–414.

3. **Laber K.** Modelowanie i optymalizacja procesów regulowanego walcowania i kontrolowanego chłodzenia wyrobów walcowni bruzdowych // Metalurgia 2009 – Nowe technologie i osiągnięcia. Częstochowa, 2009. P. 99–122.

4. **Laber K., Dyja H.** The effect of the normalizing rolling of S355J2G3 steel round bars on the selected mechanical properties of finished product // Solid State Phenomena. 2010. Vol. 165. P. 294–299.

5. **Колбасников Н.Г., Кондратьев С.Ю.** Структура. Энтропия. Фазовые превращения и свойства металлов. СПб: Наука, 2006. 363 с.

6. **Laber K., Dyja H., Kwapisz M.** Wpływ warunków przyspieszonego chłodzenia w ciągu walcowniczym na mikrostrukturę prętów okrągłych gładkich o średnicy 30 mm // Hutnik-Wiadomości Hutnicze. 2011. № 5. P. 392–395.

7. **Laber K.B., Dyja H.S., Mróz S.J.** The influence of rolling temperature on the energy and force parameters during normalizing rolling of plain round bars // Materials Science Forum. 2010. Vols. 638–642. P. 2628–2633.

8. **Polska Norma PN-EN 10263-4:2004**: Stal – Walcówka, pręty i drut do spęczania i wyciskania na zimno. Cześć 4: Warunki techniczne dostawy stali do ulepszania cieplnego, ISBN 83-243-3779-2, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2004.

9. **Теоретический** и опытный анализ распределения температуры в процессе прокатки стали 20MnB4 на прокатном стане Моргана / М. Каламож, К. Лабер, А. Грыц, Х. Дыя // Седьмая Международная молодежная науч.-практ. конф. "Инновационные технологии в металлургии и машиностроении", Екатеринбург, 26–30 ноября 2013 г.

10. **Laber K., Dyja H., Kałamorz M.** Analysis of the technology of rolling 5,5 mm-diameter wire rod of cold upsetting steel in the morgan block mill // 11th International Symposium of Croatian Metallurgical Society "Materials and Metallurgy" SHMD'2014, June 22–26 Šibenik 2014, Croatia.

Конрад Блажей Лабер, канд. техн. наук;
Хенрик Станислав Дыя, канд. техн. наук,
dyja@wip.pez.pl;
Анна Малгожата Кавалек, канд. техн. наук

УДК 537.523.4; 544.72

А.А. Бурков *(Институт материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения РАН)*

Характер массопереноса при электроискровом осаждении твердого сплава ВК8 на сталь 35 в среде гранул

Представлена установка для автоматизированного осаждения электроискровых покрытий в среде гранул и апробирована на примере нанесения твердого сплава ВК8 на сталь 35. Показано влияние размера гранул, площади контакта электродов, частоты вибрации и энергии разрядов на массоперенос при осаждении покрытий. Изучены структура, морфология, микротвердость и износостойкость полученных покрытий.

Ключевые слова: упрочняющие покрытия; электроискровая обработка мультиэлектродом; карбид вольфрама; микротвердость; износостойкость.

The automated installation for electrospark deposition of coatings in the medium of granules is presented and approved by the example deposition of carbide VK8 on to steel 35. Influence of granule size, the contact area of the electrodes, the frequency of vibration and energy discharges on the mass transfer due to the deposition of coatings is shown. The structure, morphology, microhardness and wear resistance of the obtained coatings are studied.

Keywords: coating; electrospark multielectrode deposition; tungsten carbide; microhardness; wear resistance.

Для защиты металлов и сплавов от механических повреждений и коррозии в ряде случаев применяют электрофизический метод осаждения покрытий, называемый *электроискровым легированием* (ЭИЛ) [1–3]. В его основе лежит явление электрической эрозии материала легирующего электрода (анода) и осаждения этого материала на поверхность подложки (катода) в ходе низковольтных электрических разрядов. Электроискровые покрытия могут достигать толщины 100 мкм и отличаются высокой адгезией с материалом подложки благодаря взаимному сплавлению.

Существует три типа электроискровых установок: традиционные, с ручной обработкой неподвижных подложек [1–4], механизированные [5, 6], а также редкие автоматизированные и роботизированные установки.

В схеме традиционного электроискрового легирования электрод закреплен в вибратор или вращатель для возбуждения электрического разряда в момент прохождения импульса тока, вырабатываемого генератором. Основными недостатками традиционного ЭИЛ являются низкая производительность и непосредственное участие оператора.

При использовании автоматизированных установок возникают проблемы осаждения покрытий на подложки сложной формы, а также их переоснащения для работы над новыми изделиями, вследствие того, что эти установки обрабатывают изделия конкретной геометрии. Недостатком роботизированных установок является их сложное аппаратное и программное обеспечение.

Общим и главным компонентом всех описанных выше устройств является держатель электрода с виброустройством либо с устройством вращения, что заведомо ограничивает производительность процесса осаждения покрытий в силу точечного воздействия.

В связи с этим предложена схема, в которой нет этого компонента, а вместо жестко закрепленного анода использованы гранулы, помещенные в контейнер. Контейнер подсоединен к положительному выводу с генератора импульсов, а обрабатываемая деталь — к отрицательному.

Для возбуждения разрядов необходимо прерывать контакт между катодом и гранулами, что может обеспечиваться вибрацией. Учитывая, что гранулы окружают подложку со всех сторон, то разряды могут развиваться по всей поверхности катода, контактирующей с гранулами, и в результате покрытие формируется на всей этой поверхности одновременно.

Технология данного процесса была разработана по аналогии с методом электроискрового диспергирования, целью которого является получение мелкодисперсных порошков из особо про-

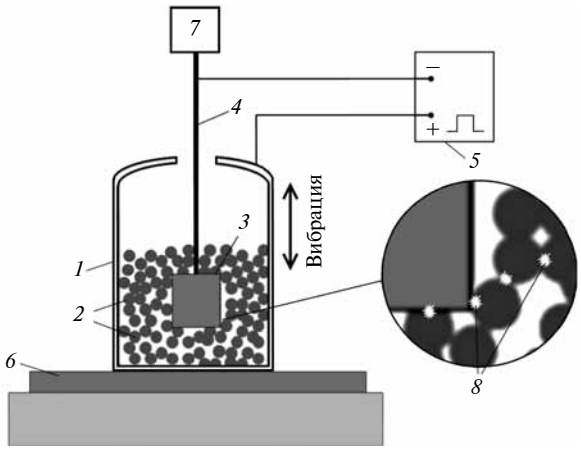


Рис. 1. Схема установки для осаждения ЭИМ-покрытий

чных и твердых материалов, чаще всего твердых сплавов путем пропускания через них низковольтных электрических разрядов под воздействием вибрации в среде диэлектрической жидкости.

Поскольку гранулы в данной схеме представляют собой мультиэлектрод, то такой способ осаждения покрытий был назван *электроискровая обработка мультиэлектродом* (ЭИМ). Данная конфигурация электроискровой обработки является более производительной за счет большей рабочей поверхности мультиэлектрода и открывает широкие перспективы для автоматизации процесса осаждения покрытий, в том числе на подложки сложной формы [**7**].

Целью работы является изучение влияния размера гранул, контактной площади подложки, длительности импульсов и частоты вибрации на массоперенос при создании покрытий ЭИМ на стали 35 с использованием гранул из твердого сплава ВК8. Твердый сплав ВК8 был выбран в качестве электродного материала, поскольку он является одним из наиболее популярных материалов для создания упрочняющих покрытий [2, 4–6].

На рис. 1 показана схема установки для осаждения электроискровых покрытий в среде гранул. Ее основным компонентом является металлический контейнер цилиндрической формы *1* высотой h = 50 мм и диаметром d = 35 мм. Контейнер заполнен гранулами *2* твердого сплава ВК8, которые выполняли функцию анода.

Использовали пять фракций гранул диаметрами от 2 до 7 мм (табл. 1). Гранулы были получены дроблением промышленных резцов марки ВК8 и соответственно имели неправильную форму, фракции гранул – просеиванием дробленого материала через сита с диаметрами отверстий 7, 6, ..., 2 мм.

Контейнер изготовлен из стали 35, футерованный твердым сплавом ВК8 для предотвращения загрязнения анода железом в процессе электроискровой обработки.

Подложки (катоды) *3* цилиндрической формы h = 10 мм и d = 12 мм были погружены в контейнер с гранулами и через стальной стержень *4* соединены с отрицательным выводом генератора импульсов *5*.

Контейнер соединен с положительным выводом генератора импульсов. Для возбуждения электрических разрядов за счет прерывания электрического контакта между катодом и анодом контейнер с гранулами и подложкой был помещен на вибровстряхиватель *6*.

В процессе осаждения покрытий частоту вибрации варьировали от 24 до 47 Гц, а амплитуда составляла 1 мм. Высоту подложки относительно дна контейнера регулировали с помощью манипулятора *7*. Между катодом и гранулами пропускались электрические импульсы амплитудой 110 А при напряжении 30 В с частотой 100 Гц. Длительность импульсов 0,1...1,5 мс. Вследствие вибрации гранулы двигались вдоль поверхности образца, что приводило к возникновению электрических разрядов *8* между ними.

Общее время обработки для каждого образца 10 мин. Каждые 2 мин процесс прерывали, и электроды раздельно взвешивали на электронных весах ShinkoHTR-220CE с точностью 0,1 мг.

Фазовый состав покрытий исследовали на рентгеновском дифрактометре ДРОН-7 в CuKα-излучении. Микротвердость по Виккерсу измеряли на микротвердомере ПМТ-3М при нагрузке 0,5 Н.

1. Размер фракций гранул твердого сплава ВК8

Параметр	Значение				
Диаметр отверстий сита, мм	2	3	4	5	6,7
Размер гранул фракции, мм	>2 ⩽ 3	>3 ⩽ 4	>4 ⩽ 5	>5 ⩽ 6	>6 ⩽ 7
Условный средний диаметр гранул, мм	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5
Число гранул в 100 г	1610	640	273	124	89
Обозначение фракций	23	34	45	56	67

Абразивную износостойкость покрытий определяли с помощью трибометра (CSM Instruments, Switzerland) по схеме шар–плоскость. В качестве абразивного материала использовали суспензию Al_2O_3 со средним диаметром частиц 6 мкм, в соляровом масле МС20. Корундовый шар диаметром 20 мм вращался с линейной скоростью 0,93 м/с.

Параметр шероховатости покрытий измеряли на "Профилометре 296" при отсечке шага 0,25 мм с длиной трассы 3 мм.

В процессе электроискрового осаждения покрытий происходят низковольтные электрические разряды между катодом и анодом. В ходе разряда возникает электрическая эрозия материала электродов в твердой, жидкой и газовой фазах. При этом эродированный материал, выброшенный с поверхности электрода, попадает на поверхность противоположного электрода и в окружающую среду.

С поверхности анода выбрасывается значительно больше материала, чем с поверхности катода, поэтому в процессе ЭИЛ, как правило, наблюдаются снижение массы анода и увеличение массы катода. При этом часть материала электродов выбрасывается в окружающую среду в виде продуктов эрозии и в результате массовый баланс процесса, выражается как

$$\Delta m_a + \Delta m_c < 1,$$

где Δm_a, Δm_c – изменение массы анода и катода соответственно.

Эффективность процесса ЭИЛ выражается коэффициентом массопереноса k, который вычисляется как отношение изменения массы катода к изменению массы анода: $k = \Delta m_c/\Delta m_a$. При традиционном ЭИЛ для электродной пары сталь 35–ВК8 коэффициент массопереноса $k = 0{,}2...0{,}5$ [6, 8].

Кинетические зависимости изменения массы электродов при электроискровой обработке в среде гранул представлены на рис. 2. С ростом времени обработки снижается масса гранул и увеличивается масса катода, что обусловлено переносом карбида вольфрама и кобальта из анода в поверхностные слои стальной подложки в ходе разрядов.

Интенсивность массопереноса при ЭИМ зависела от размера фракции используемых гранул. Изучение массопереноса при ЭИМ показало, что привес катода увеличивается с увеличением размера фракции гранул. Фракция 67 выпадает из этой зависимости, потому что гранулы этой фракции слишком большие и не могут свободно двигаться под действием вибрации в ограниченном пространстве между стенками контейнера и подложкой. Вероятно, это пространственное ограничение

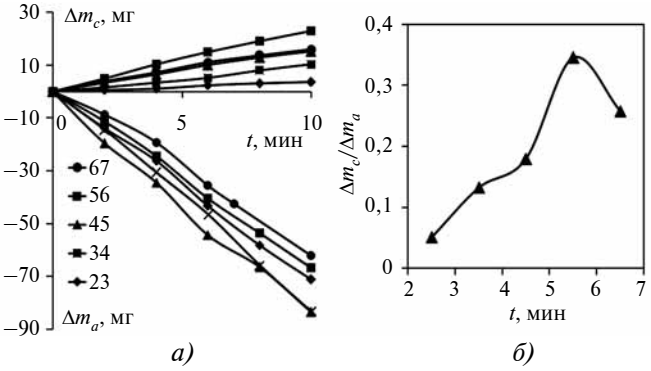


Рис. 2. Кинетика массопереноса при использовании фракций гранул разного размера (*а*) и зависимость коэффициента массопереноса от среднего размера гранул за 10 мин обработки (*б*)

возникает в случае, когда расстояние между поверхностью катода и внутренней поверхностью контейнера меньше двух диаметров средней гранулы.

Анализ рис. 2 показал, что эрозия анода при использовании фракций малого размера (23...45) достигает максимальных значений по сравнению с более крупными фракциями. Возможно, это обусловлено тем, что мелкие гранулы более подвержены механическому разрушению в процессе ЭИМ за счет совместного термомеханического воздействия разрядов и виброударов.

В ходе предварительных экспериментов обнаружено, что массоперенос может меняться в зависимости от соотношения размеров катода и количества гранул. Поэтому было введено понятие контактной плотности электродов, которое выражается как отношение площади поверхности катода S_C к общей площади поверхности системы, складывающейся из S_C и площади поверхности всех гранул S_G:

$$S_C/(S_C + S_G). \quad (1)$$

Данный эксперимент был проведен поочередным погружением подложек в форме стержня диаметром 1 см^2 в контейнер с гранулами фракции 56 на одинаковую глубину. Каждый раз использовали новые подложки, и часть их поверхности была электрически изолирована с помощью термостойкой ленты. Для варьирования S_C в диапазоне от 0,68 до 7,92 см^2 изолировали разную площадь катода. ЭИМ-процесс осуществлялся в течение 2 мин для каждого образца. Для оценки S_G форму гранул принимали за сферу диаметром 5,5 мм.

Анализ результатов массопереноса показал, что с возрастанием контактной поверхности подложки увеличиваются привес катода и эрозия анода (рис. 3, *а*). Коэффициент k также повышается (рис. 3, *б*).

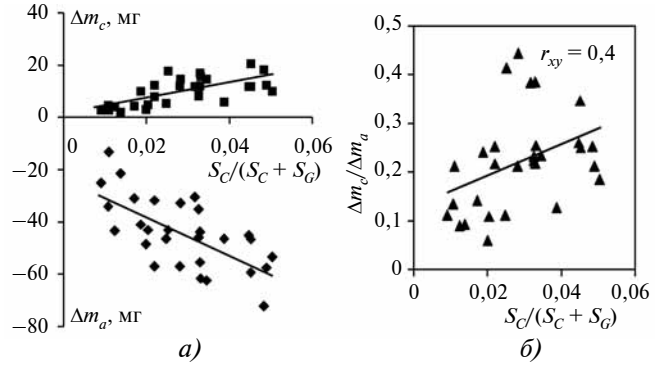


Рис. 3. Привес катода и эрозия анода в зависимости от плотности контакта электродов (*а*) и коэффициент массопереноса (*б*). Длительность импульсов 0,5 мс, фракция 56

Изучение поверхностей гранул и катода показало, что единичный *электрический импульс* (ЭИ) длительностью 0,5 мс, посланный с генератора, по схеме ЭИМ, приводит к возникновению нескольких разрядов, воздействие которых оставляет следы на поверхностях электродов в форме эрозионных кратеров. При этом разряды могут возникать в двух случаях: на границе гранула–катод и гранула–гранула.

Измерение диаметров эрозионных кратеров на поверхности катода после 10 с ЭИМ и статистическая обработка этих данных показали, что их размеры находятся в широком диапазоне от 50 до 1200 мкм (рис. 4, *а*).

Повышение размера фракции гранул приводит к увеличению среднего диаметра кратеров (рис. 4, *а*, *б*), которые зависят от энергии разрядов [4]. Это вызвано тем, что при снижении размера гранул повышается их число (см. табл. 1) и, соответственно, увеличивается число контактов на пути ЭИ от стенок контейнера к поверхности катода. При этом он ослабляется и дробится, что снижает энергию разряда на катоде. Это объясняет низкий массоперенос при использовании фракции гранул малого размера.

Влияние контактной плотности электродов на массоперенос при ЭИМ может быть объяснено предположением, что разряды равномерно распределяются по всей поверхности системы, которая складывается из поверхностей гранул и катода (1). Соответственно, при большем погружении катода на его поверхность приходится большее число разрядов, что и приводит к увеличению коэффициента массопереноса.

Как было отмечено ранее, ЭИМ проводится в условиях вибрации для возбуждения электрических разрядов между гранулами и подложкой. С ростом частоты вибрации гранул и подложки привес катода практически не изменяется (рис. 5, *а*). При этом наблюдается уменьшение массы анода, что обусловлено интенсификацией механического разрушения гранул ВК8 с увеличением энергии (частоты) вибрации. Соответственно снижается коэффициент массопереноса (рис. 5, *б*). Наибольший перенос наблюдается при частоте вибрации 28 Гц, поэтому дальнейшие исследования проводили на этой частоте.

Известно, что при традиционном ЭИЛ с ростом длительности импульсов увеличиваются эрозия анода и привес катода [8]. Аналогичная закономерность характерна для ЭИМ (рис. 6). Так, при повышении длительности импульсов от 0,1 до 1,5 мс увеличивалась эрозия анода от 50 до 120 мг/см^2, а привес катода от 10 до 33 мг/см^2.

Максимум коэффициента массопереноса находился в интервале длительностей импульсов от 0,5 до 1 мс, где достигал значения 0,35. Данная ве-

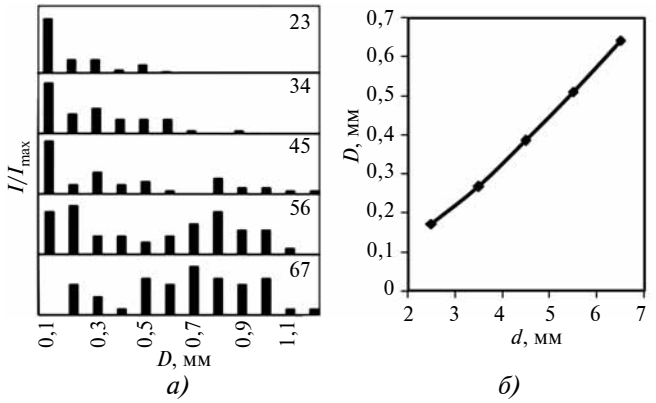


Рис. 4. Распределение эрозионных кратеров на катоде по диаметру с различными фракциями гранул (*а*) и средний диаметр эрозионных кратеров в зависимости от среднего диаметра гранул используемой фракции (*б*)

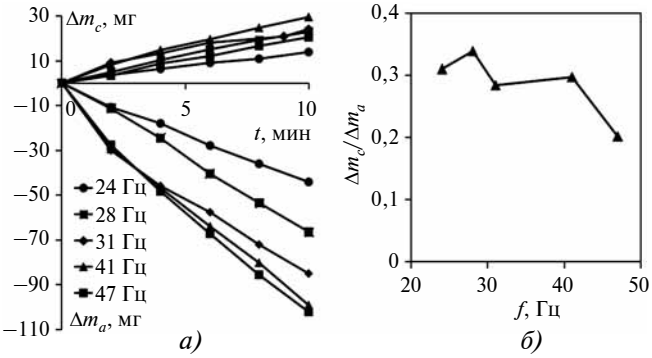


Рис. 5. Кинетические зависимости массопереноса при ЭИМ с различными частотами вибрации (*а*) и зависимость коэффициента массопереноса от частоты вибрации для 10 мин ЭИМ-обработки (*б*)

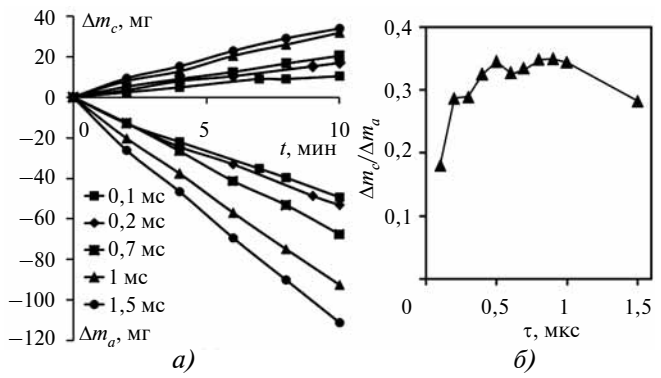


Рис. 6. Кинетика массопереноса при ЭИМ для различных длительностей импульсов (*а*) и коэффициент массопереноса за 10 мин ЭИМ в зависимости от длительности импульсов (*б*)

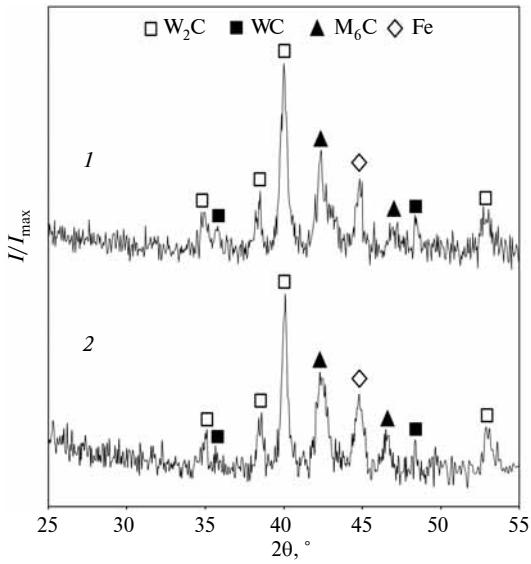


Рис. 7. Рентгенофазовый анализ ЭИМ-покрытий, полученных с использованием фракции гранул 34 (*1*) и 56 (*2*). Длительность импульсов 0,5 мс, частота вибрации 28 Гц

личина коэффициента массопереноса является нормальной для традиционного ЭИЛ с электродной парой ВК8—сталь 35 [8].

На рис. 7 показаны участки рентгеновских дифрактограмм ЭИМ-покрытий, осажденных с использованием фракций гранул малого (34) и большого размеров (56).

Результаты анализа дифрактограмм показали, что фазовый состав данных покрытий практически не различается. В составе поверхности образцов присутствуют фазы субкарбида вольфрама W_2C, η-фазы типа M_6C (M = W, Fe, Co), α-железа из подложки и небольшое количество фазы карбида вольфрама WC. Высокая интенсивность рефлексов фаз W_2Cи M_6C по сравнению с WC объясняется декарбидизацией карбида вольфрама при его

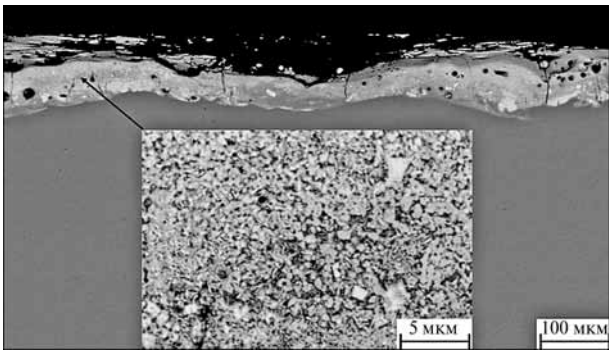


Рис. 8. СЭМ-изображения поперечного сечения покрытия, осажденного с использованием фракции гранул 56. Длительность импульсов 0,5 мс, частота вибрации 28 Гц

взаимодействии с железом и кобальтом в ходе электрических разрядов [9].

Структура ЭИМ-покрытия показана на рис. 8. Она подобна структуре традиционных ЭИЛ-покрытий и представлена комбинацией микронных и субмикронных зерен карбидов вольфрама и η-фазы, погруженных в матрицу, состоящую из железа, вольфрама, углерода и кобальта.

По данным EDS-анализа в матрице полученных покрытий концентрация железа изменялась от 60 до 80 %, без учета концентрации углерода. В традиционных ЭИЛ-покрытиях, полученных с использованием твердых сплавов марки ВК, концентрация железа обычно составляет около 40 %. Изображения поперечного сечения покрытий показывают наличие пор и трещин.

В табл. 2 приведены главные характеристики WC–Co ЭИМ-покрытий на стали 35. Толщина покрытий увеличивалась с ростом размера фракции гранул в диапазоне от 38 до 98 мкм. Это обусловлено более высокими значениями привеса катода при ЭИМ с использованием соответствующих гранул (см. рис. 2).

2. Характеристики покрытий

Параметр	Фракция	
	34	56
Средняя толщина, мкм	38	99
Средняя микротвердость, ГПа	11,1 ± 2	12,4 ± 2
Микроабразивная износостойкость, кН · м/мм^3	2,4	2,8
Параметр шероховатости *Ra*, мкм	3,9	5,4

Примечание. Микротвердость стали 35 — (2,5±0,1) ГПа; износостойкость стали 35 — 0,24 кН · м/мм^3.

Микротвердость полученных покрытий и их микроабразивная износостойкость были выше по сравнению с материалом основы более чем в 4 и 10 раз соответственно, что говорит о существенном эффекте упрочнения. Образец, обработанный в среде более крупных гранул (56) имеет большие значения твердости и износостойкости, что вызвано большим количеством перенесенного на его поверхность WC–Co-материала (см. рис. 2).

Параметр шероховатости полученных образцов увеличивается с ростом размера фракции (см. табл. 2). Поскольку единственным источником рельефа поверхности катода после электроискровой обработки являются эрозионные кратеры [10, 11], то это объясняется увеличением диаметра кратеров с ростом размера гранул, как было показано на рис. 5.

Выводы

1. Разработана автоматизированная установка для осаждения электроискровых покрытий, отличительной особенностью которой является использование гранул диаметром 2...7 мм в качестве анода, и апробирована на примере получения WC–Co-покрытий на стали 35 в среде гранул ВК8.

2. Основными факторами, определяющими массоперенос при ЭИМ и, соответственно, толщину покрытий, являются: размер гранул, энергия импульсов и площадь контакта катода с гранулами. Привес катода увеличивается с ростом размера фракции гранул, что объясняется возрастанием энергии разрядов на катоде при увеличении диаметра гранул в процессе ЭИМ. Увеличение площади поверхности катода приводит к росту эрозии гранул и привесу подложки. С повышением длительности импульсов от 0,1 до 1,5 мс увеличиваются эрозия анода и привес катода в 2,5 и 3 раза соответственно.

3. Электроискровая обработка стали 35 в среде гранул из твердого сплава ВК8 приводит к формированию WC–Co-покрытий толщиной 38...100 мкм, которые повышают микротвердость и износостойкость поверхности стали в 4 и 10 раз соответственно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Mass** loss of copper alloy electrode during TiB_2 coating by electrospark deposition / C. Luo, S. Dong, X. Xiong, N. Zhou // Surface and Coatings Technology. 2009. V. 203. P. 3333–3337.

2. **Николенко С.В., Бурков А.А.** Некоторые аспекты механизированного электроискрового легирования стали вращающимся торцевым электродом твердыми сплавами с различной частотой и длительностью электрических импульсов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 5. С. 21–27.

3. **Frangini S., Masci A.** A study on the effect of a dynamic contact force control for improving electro spark coating properties // Surface and Coatings Technology. 2010. V. 204. P. 2613–2623.

4. **Ribalko A.V., Sahin O.** A modern representation of the behaviour of electrospark alloying of steel by hard alloy // Surface and Coatings Technology. 2006. V. 201. P. 1724–1730.

5. **Wang R., Qian Y., Liu J.** Interface behavior study of WC92–Co8 coating produced by electrospark deposition // Applied Surface Science. 2005. V. 240. P. 42–47.

6. **Николенко С.В., Пячин С.А., Бурков А.А.** Формирование электроискровых покрытий из твердого сплава ВК8 с добавкой Al_2O_3 // Известия вузов. Цветная металлургия. 2011. № 1. С. 58–62.

7. **Бурков А.А., Пячин С.А., Метлицкая Л.П., Пугачевский М.А.** Использование гранул WC–Co сплава для нанесения электроискровых покрытий. Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 5 (101). С. 16–21.

8. **Zamulaeva E.I., Levashov E.A., Kudryashov A.E., Vakaev P.V., Petrzhik M.I.** Electrospark coatings deposited on to an Armco iron substrate with nano- and microstructured WC–Co electrodes: Deposition process, structure, and properties // Surface and Coatings Technology. 2008. V. 202. P. 3715–3722.

9. **Burkov A.A., Pyachin S.A.** Investigation of WC—Co Electrospark Coatings with Various Carbon Contents. Journal of Materials Engineering and Performance. 2014, Vol. 23 (6). P. 2034–2042.

10. **Tušek J., Kosec L., Lešnjak A., Muhič T.** Electrospark deposition for die repair // Metalurgija. 2012. V. 51. P. 17–20.

11. **Ribalko A.V., Sahin O., Korkmaz K.** A modified electrospark alloying method for low surface roughness // Surface and Coatings Technology. 2009. V. 203. P. 3509–3515.

Александр Анатольевич Бурков, канд. физ.-мат. наук,
burkovalex@mail.ru

УДК 669.295:621.771.016

У.Х. Угурчиев , В.В. Столяров
(Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук)

Влияние импульсного тока при прокатке на деформируемость и микротвердость титановых сплавов

Рассмотрено влияние импульсного тока при прокатке на деформируемость и микротвердость технически чистого титана ВТ1-0 и высокопрочных крупнозернистых титановых сплавов ВТ6 и TiNi. Показано, что прокатка с током снижает степень деформационного упрочнения титановых сплавов и повышает деформируемость ВТ6 и TiNi по сравнению с прокаткой без тока. Более высокая плотность тока приводит к более высокой деформируемости. Технология, основанная на использовании тока, применима для получения длинномерных изделий тонкого сечения из титановых сплавов.

Ключевые слова: прокатка; импульсный ток; деформируемость; микротвердость; память формы.

Influence of pulse current due to rolling on deformability and microhardness of VT1-0 and high strength alloys VT6 and TiNi is considered. It is shown that rolling with current decreases deformation strengthening and increases deformability for VT6 and TiNi in comparison with rolling without current. Technology based on current application can be used for processing of long-sized semiproduct of thin section out of titanium alloys.

Keywords: rolling; pulse current; deformability; microhardness; shape memory.

Введение. Проблема повышения деформируемости конструкционных материалов, особенно хрупких и малопластичных сплавов, является важной как в научном, так и в прикладном значении.

К материалам с ограниченной деформационной способностью при комнатной температуре относятся исследуемые титановые сплавы – интерметаллид TiNi с эффектом памяти формы и двухфазный ВТ6, обладающие высоким комплексом служебных свойств [1].

Получение длинномерных изделий тонкого сечения (проволоки, фольги, листа) из титановых сплавов является непростой задачей, что связано с быстрым упрочнением и разрушением материала при холодной деформации. Так, в сплавах TiNi и ВТ6 деформация до разрушения при холодной прокатке не превышает $e = 0{,}6$ [2, 3]. В качестве альтернативного решения этой проблемы можно рассматривать применение прокатки с импульсным током, при которой технологическая пластичность повышается без существенного разогрева металла [2–5].

Целью работы является исследование влияния импульсного тока в процессе прокатки на деформируемость и микротвердость титановых сплавов.

Материалы и методы исследования. Для исследования использовали следующие материалы: технически чистый титан ВТ1-0, двухфазный ($\alpha + \beta$)-сплав ВТ6 и сплав $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ с памятью формы на основе интерметаллидной фазы. Крупнозернистое состояние с размером зерен от 20 до 50 мкм в материалах получали отжигом при 700 °С (ВТ1-0), отжигом при 850 °С (сплав ВТ6) и закалкой с 800 °С в воде ($Ti_{49,3}Ni_{50,7}$).

Холодная прокатка без тока и с током выполнена на полосах сечением (2...4) × 6 мм^2 и длиной 100 мм. Для сплава ВТ1-0 использовали пластины толщиной 2 мм, для сплавов ВТ6 TiNi – 4 мм.

При прокатке в зону деформации вводили импульсный ток плотностью $j = 80...160$ А/мм^2, длительностью импульса $(1...3)\cdot10^{-4}$ с и частотой $(0{,}8\pm0{,}1)\cdot10^3$ Гц. В одном эксперименте для сплавов TiNi и ВТ6 варьировали длительность импульса в интервале $(0{,}8...1{,}6)\cdot10^{-4}$ с.

Микротвердость измеряли после каждой серии циклов в двух точках поперечного сечения на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор 1,962 Н (200 гс) и длительности выдержки 10 с с точностью ±5 %.

Деформируемость сплавов оценивали истинной деформацией до появления микротрещин $e = \ln t_0/t_к$, где t_0, $t_к$ – начальная и конечная толщина полосы.

Экспериментальные данные. В табл. 1 представлены данные по деформируемости титановых

Истинная деформация до разрушения при прокатке с током и без тока

Материал	t_0, мм	$e_j = 0$ (без тока)	e_j (с током)	$e_j/e_{j=0}$
ВТ1-0	2	2,1	2,1	1,0
Ti_{49},$3Ni_{50,7}$	4	0,57	2,8	4,91
ВТ6	4	0,55	2,35	4,27

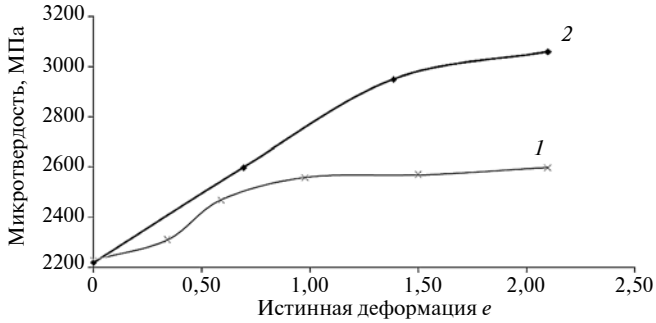


Рис. 1. Зависимость микротвердости сплава ВТ1-0 от истинной деформации при прокатке с током (*1*) и без тока (*2*)

сплавов с током e_j и без тока $e_{j=0}$. В чистом титане ВТ1-0 преимущество прокатки с током по сравнению с холодной прокаткой отсутствует, что, возможно, связано с малой толщиной исходного образца (t_0 = 2 мм). В то же время для образцов большой толщины (t_0 = 4 мм) введение тока при прокатке сплавов ВТ6 и TiNi повышает деформируемость более чем в 4–5 раз по сравнению с прокаткой без тока.

Таким образом, преимущество прокатки с током зависит от химического или фазового состава сплава: оно повышается при переходе от однофазного чистого титана к многофазным или интерметаллидным сплавам.

На рис. 1 показана эволюция микротвердости образцов ВТ1-0 в процессе прокатки с током и без тока. В интервале e = 0...0,7 значения микротвердости для обеих кривых в пределах погрешности совпадают, а при больших значениях e микротвердость при прокатке с током заметно меньше, чем при обычной прокатке.

Значительное различие в микротвердости сплава, которое возрастает с деформацией, свидетельствует о разной степени деформационного упрочнения. Для прокатки с пропусканием тока она ниже, чем для обычной прокатки. Это согласуется с литературными данными для большинства чистых металлов в том, что воздействие импульсного тока при прокатке уменьшает наклеп, свойственный обычной прокатке, и способствует появлению разупрочненных зон [5].

Рассмотрим эволюцию микротвердости с деформацией для сплава ВТ6.

На рис. 2 показано значительное увеличение микротвердости с последующим разрушением образца при малых степенях деформации при обычной прокатке по сравнению с прокаткой с током. Как и в случае с чистым титаном, это также связано с более сильным деформационным упрочнением сплава в отсутствие тока, которое даже приводит к разрушению. Отметим, что при прокатке с током, несмотря на меньшую степень деформационного упрочнения, максимальная твердость выше, чем при прокатке без тока.

На рис. 3 представлена эволюция микротвердости образцов сплава TiNi при прокатке с током и без тока. Видно, что при прокатке без тока образец сплава TiNi, как и в случае со сплавом ВТ6, быстро упрочняется и затем разрушается. Более медленный рост микротвердости на кривой *1* объясняется снижением внутренних напряжений в сплаве под воздействием импульсного тока.

Сравнение абсолютных значений деформируемости с током и без тока для разных сплавов в табл. 1 показало, что они близки для высокопрочных сплавов $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ и ВТ6, но сильно отличаются от пластичного сплава ВТ1-0, т.е. химический состав сплава традиционно влияет не только на деформируемость при прокатке без тока, но и с током.

Кроме химического состава сплавов на деформируемость могут влиять режимы тока. На примере сплавов $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ и ВТ6 показано, что варьирование параметров импульсного тока (плотности

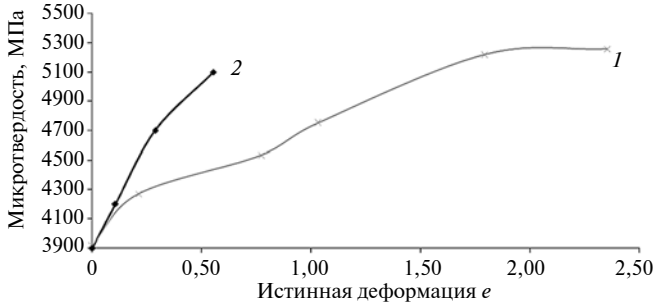


Рис. 2. Зависимость микротвердости сплава ВТ6 от истинной деформации при прокатке с током (*1*) и без тока (*2*)

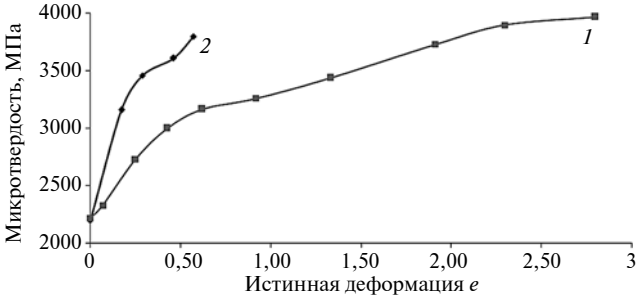


Рис. 3. Зависимость микротвердости сплава TiNi от истинной деформации при прокатке с током (*1*) и без тока (*2*)

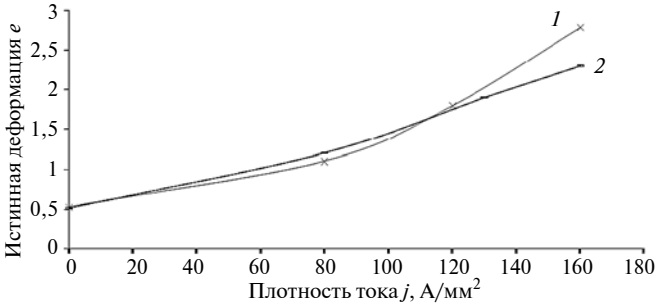


Рис. 4. Зависимость деформируемости сплавов TiNi (*1*) и ВТ6 (*2*) от плотности тока ($\tau = 1{,}6 \cdot 10^{-4}$ с)

и длительности импульса тока) оказывает сильное влияние на деформируемость сплава.

Так, на рис. 4 видно, что с повышением плотности тока повышаются значения максимальной деформации, до которой образец деформируется без видимых микротрещин при одинаковой длительности импульса ($\tau = 1{,}6 \cdot 10^{-4}$ с). Увеличение плотности тока в 2 раза (от 80 до 160 А/мм^2) приводит к более чем двухкратному повышению деформации.

Увеличение длительности импульса тока (рис. 5) также повышает деформируемость, особенно заметно при плотности тока в интервале от 135 до 160 А/мм^2 [2].

Таким образом, общим для исследованных сплавов является повышение деформируемости и более слабое деформационное упрочнение при прокатке с током. Это позволяет избежать разрушения на начальных стадиях деформации и достигнуть предельно высоких значений микротвердости.

В обоих вариантах прокатки упрочнение обусловлено повышением плотности дислокаций с деформацией, которая при прокатке с током снижается за счет взаимодействия свободных электронов с дислокационными скоплениями. При прокатке с током наблюдаемое повышение деформируемости можно объяснить и тепловым вкладом импульсного тока способствующего.

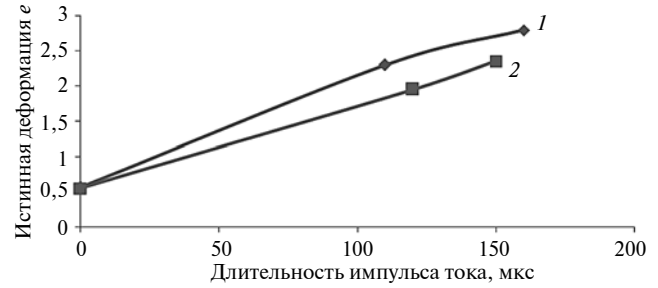


Рис. 5. Зависимость деформируемости сплавов TiNi (*1*) и ВТ6 (*2*) от длительности импульса (j = 135 А/мм^2)

Однако численная оценка теплового вклада по формулам, приведенным в работе [6], показала, что разогрев образцов при прокатке с током не превышает 150 °С, что подтверждается прямыми измерениями инфракамерой, выполненными в работе [7]. Поскольку вклад теплового эффекта мал, то наблюдаемый эффект повышения деформируемости связан с электростимулированием, физическая природа которого описывается в работе [8].

Метод прокатки с импульсным током был опробован для получения тонкой проволоки из исследуемых сплавов. Прокатку осуществляли в калибрах с изменяемым диаметром от 8 до 1 мм. В связи с достаточной деформируемостью промежуточные отжиги не использовали. Качество поверхности полученной проволоки соответствовало требованиям стандартов и технических условий на проволоку.

Выводы

1. Деформируемость высокопрочных крупнозернистых титановых сплавов ВТ6 и $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ при прокатке с током повышается в 4 раза и более по сравнению с прокаткой без тока.

2. Эффективность прокатки с током зависит от химического или фазового состава сплава и режимов тока. Она повышается при переходе от однофазного сплава ВТ1-0 к многофазному ВТ6 или интерметаллидному сплаву $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$, а также при повышении плотности тока от 80 до 160 А/мм^2 и длительности импульса 80 до 160 мкс.

3. Прокатка с током снижает степень деформационного упрочнения, что позволяет избежать разрушения и повысить микротвердость даже выше, чем при прокатке без тока.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С.** Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: справочник. М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. 520 с.

2. **Влияние** режимов ЭПД на деформируемость и функциональные свойства сплава TiNi с памятью формы / И.Б. Гуртовая, К.Э. Инаэкян, А.В. Коротицкий, У.Х. Угурчиев, С.Ю. Макушев, И.Ю. Хмелевская, Е.С. Данилова, А.Е. Сергеева, В.В. Столяров, С.Д. Прокошкин // Жур-

нал функциональных материалов. 2008. Т. 2. № 4. С. 130–137.

3. **Семендеева О.В., Учеваткина Н.В., Столяров В.В.** Микроструктура и деформируемость сплава ВТ6, подвергнутого электропластической прокатке // Деформация и разрушение материалов. 2011. № 8.

4. **Повышение** деформируемости крупнозернистого TiNi-сплава при прокатке с наложением импульсного тока / В.В. Столяров, У.Х. Угурчиев, И.Б. Гуртовая, С.Д. Прокошкин // Металловедение и термическая обработка металлов. 2008. № 3. С. 40–43.

5. **Физические** основы и технологии обработки современных материалов (теория, технология, структура и свойства) / О.А. Троицкий, Ю.В. Баранов, Ю.С. Авраамов, А.Д. Шляпин. В 2 т. Москва-Ижевск: Институт компьютерных технологий, 2004. 590 с.

6. **Албагачиев А.Ю., Угурчиев У.Х.** Метод расчета температуры электропластической прокатки. Информатика и технология // Межвузовский сборник МГУПИ. М.: МГУПИ, 2008. С. 45–47.

7. **Тепловые** эффекты при электропластической деформации и растяжении сплава TiNi / У.Х. Угурчиев, И.А. Пантелеев, О.А. Плехов, О.Б. Наймарк, В.В. Столяров // Тезисы "Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов". МИСиС, 28.10.2009. С. 123.

8. **Соснин О.В., Громов В.Е., Козлов Э.В. и др.** Электростимулированная малоцикловая усталость. М.: Недра коммюникейшинс ЛТД, 2000. 208 с.

Умар Хажбикарович Угурчиев,
umar77@bk.ru;
Владимир Владимирович Столяров, д-р техн. наук

С.И. Богодухов,
А.В. Синюхин, Е.С. Козик

КУРС МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ В ВОПРОСАХ И ОТВЕТАХ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

2014 г. Объем 352 с. Формат 60x88 1/16
Переплет ISBN 978-5-94275-750-2

Цена 350 р.

Пособие состоит из шести разделов. В каждом содержатся сведения из соответствующей области материаловедения. В первом приведены вопросы-тесты. Тесты содержат по четыре альтернативных ответа. В конце каждого раздела приведены ответы.

Второй раздел пособия содержит справочные сведения по углеродистым и легированным конструкционным сталям, инструментальным сталям, цветным металлам и сплавам (марочные обозначения, химический состав, некоторые свойства, режимы термической обработки), неметаллическим материалам. Может использоваться при решении задач первой части и как самостоятельное пособие для подбора материалов при выполнении курсовых и дипломных работ.

В третьем и четвертом разделах приведены фрагменты, имитирующие эхо-распечатки обучающей и контролирующей программ «Диаграммы состояния» и «Упражнения по диаграмме железо–углерод». Пятый раздел содержит материалы по программе «Экзаменатор».

В шестом разделе приведены примеры выбора материала и расчета деталей по критерию конструкционной прочности.

Пособие предназначено для закрепления теоретических знаний, полученных студентами на занятиях по материаловедению, путем решения задач, а также может быть использовано при выборе материалов для конкретных деталей.

ПРИОБРЕСТИ КНИГУ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ
можно, прислав заявку:

по почте: 107076, г. Москва, Стромынский пер., 4;
по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительная информация по телефонам:
(499) 269-52-98, 269-66-00 и на сайте WWW.MASHIN.RU

УДК 621.726

В.Н. Кокорин, С.Ю. Кондратьев*, А.М. Кожин, В.А. Щепочкин***, Н.А. Сизов, А.В. Кокорин***
(Ульяновский государственный технический университет,
**Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,*
***ООО "Димитровградский завод порошковой металлургии",*
****Ульяновский государственный университет)*

Оценка технико-экономической эффективности процессов прессования высокоплотных изделий методом порошковой металлургии

Проведена оценка экономической эффективности существующих технологий получения из железного порошка деталей конструкционного назначения с плотностью, приближенной к теоретической. Представлена сравнительная технико-экономическая оценка основных технологий порошковой металлургии, используемых при получении тяжелонагруженных деталей. Показано, что для выбора экономически целесообразных производственных процессов в случае изменения производственных условий или конъюнктуры рынка необходимо проводить комплексный анализ, включая технические и экономические показатели перспективности принимаемых решений.

Ключевые слова: конструкционные материалы; порошковая металлургия; уплотнение; экономическая эффективность; технологические процессы.

The article describes the economic evaluation of technologies for producing of structural parts purpose of iron powder with density close to the theoretical value. The comparative technical and economic evaluation of the core technologies of powder metallurgy in the preparation of highly loaded parts is executed. It is shown that for choice of economically expedient productions in case of change of working conditions or market condition it is necessary to carry out the complex analysis, including both technical and economic indicators of prospects of made decisions.

Keywords: structural materials; powder metallurgy; seal; economic efficiency; production technology.

Введение. В настоящее время при жесткой конкурентной борьбе за рынок выпускаемой продукции машиностроения, автомобилестроения, тракторостроения решение вопросов об обоснованном выборе перспективных путей улучшения качества деталей, повышении производительности труда и ресурсосберегающих технологиях является своевременным и актуальным.

Важную роль в решении этих вопросов отводят новым материалам, обладающим повышенным комплексом механических характеристик. Порошковые материалы и изделия из них занимают весомую долю в производстве деталей с улучшенными эксплуатационными и специальными свойствами.

Основным потребителем высокоплотных заготовок и деталей из порошковых материалов являются отрасли машиностроения, автомобилестроения и ряд других (детали плотностью, приближенной к теоретической; заготовки плотностью 0,95...0,97).

Порошковые конструкционные детали должны обладать высокой плотностью и прочностью, иметь остаточную пористость менее 1 %, что по уровню физико-механических свойств сопоставимо с литыми легированными сталями и сплавами. Определяющей причиной низких механических свойств спеченных изделий является остаточная пористость. В связи с этим выбор технологических операций изготовления таких деталей должен обеспечивать минимально достижимую пористость изделий.

Важно, что при выборе рациональной технологии получения высокоплотных тяжелонагруженных деталей наряду с технологическими особенностями процесса необходимо учитывать также и технико-экономические аспекты, в частности, трудоемкость, энергоемкость, материалоемкость, тип производства, размерную точность, конфигурацию деталей и т.д.

Для оценки эффективности технологий целесообразно использовать систему *технико-эконо-*

мических показателей (ТЭП), что позволит из многообразия предлагаемых альтернативных решений выбрать максимально выгодное при обеспечении высокого уровня механических свойств изделия.

Целью работы является оценка эффективности применяемых в настоящее время технологий получения высокоплотных порошковых изделий на основе анализа их технико-экономических показателей.

Анализ технико-экономических показателей технологий получения порошковых изделий. На рис. 1 приведена классификация деталей и технологий их изготовления по эксплуатационным и механическим свойствам получаемых порошковых деталей общего назначения на основе железа. Предлагаемая классификация разработана на основе известной классификации И.Д. Радомысельского (Металлокерамические конструкции и детали // Современные проблемы порошковой металлургии: сб. статей / под ред. И.М. Федорченко. Киев: Наукова думка, 1970. 343 с.).

Анализ известных технологий изготовления порошковых деталей показал, что применение *горячего гидростатического изостатического прессования* (ГИП) позволяет получить остаточную пористость до 1...3 % и одновременно повысить прочность на изгиб. Однако существующие технологии реализации ГИП являются дорогостоящими и требуют использования оболочек для капсулирования порошков.

Для получения практически беспористых порошковых изделий возможно применение процесса *динамического горячего прессования* (ДГП), разработанного в Новочеркасском государственном техническом университете Ю.Г. Дорофеевым. Характерными дефектами заготовок и деталей, полученных по технологии ДГП, являются поверхностные микротрещины и поры.

Наиболее перспективным является метод интенсивного статического уплотнения увлажненных смесей при получении плотных изделий с пористостью до 3 % [1–3], что превышает необходимый уровень, соответствующий требованиям к тяжелонагруженным деталям.

Способ прессования металлического порошка в присутствии жидкой фазы [1–3] при получении порошковых структур плотностью, приближенной к теоретической в результате перемещения од-

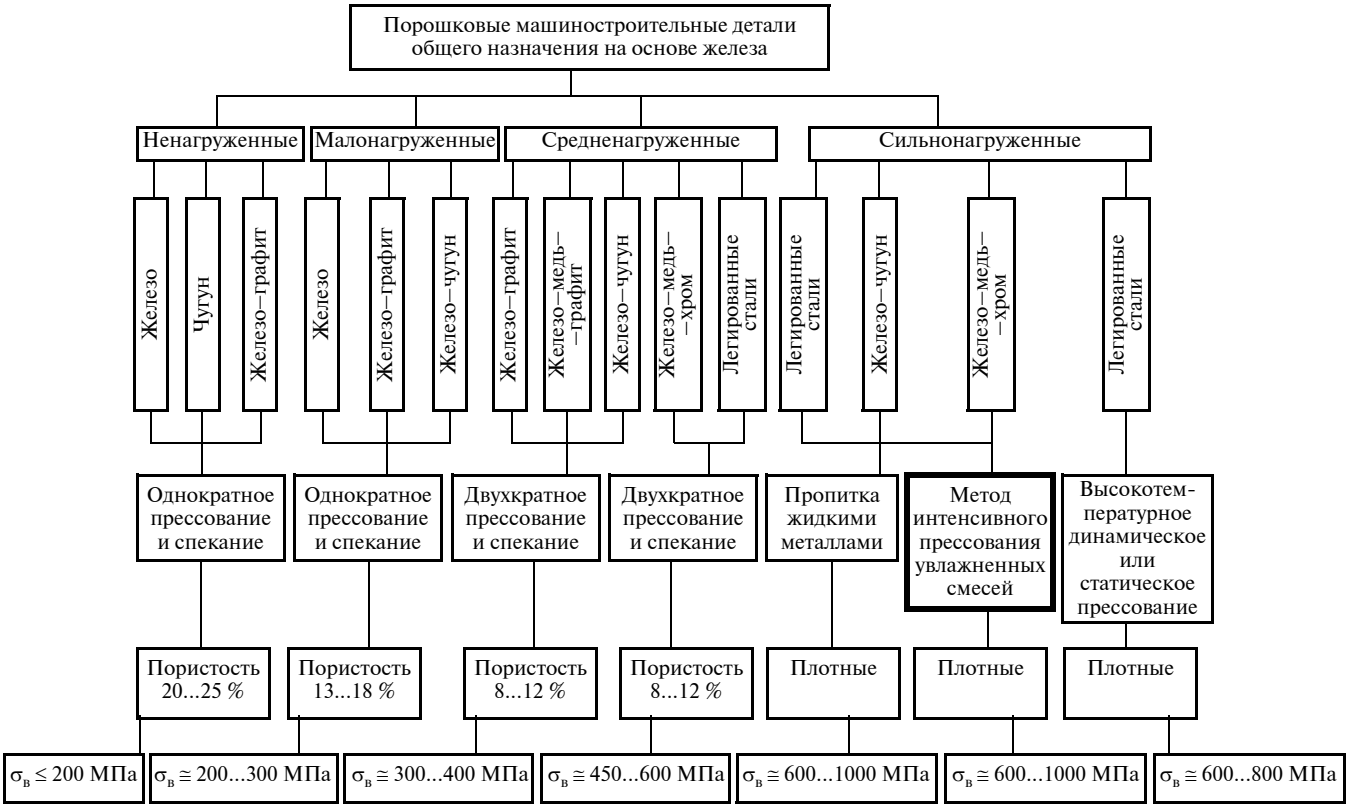


Рис. 1. Технологический классификатор деталей конструкционного назначения, изготовленных из железного порошка

ной из фаз структурно-неоднородного гетерофазного материала, разработан сотрудниками СПбГПУ и УлГТУ.

В развитие этого способа предложена новая технология прессования увлажненных механических смесей с наложением ультразвуковых колебаний [4] и сдвиговых деформаций по схеме "тающей" оснастки (см. кн.: Перельман В.Е. Формирование порошковых материалов. М.: Металлургия, 1978. 232 с.), позволяющая интенсифицировать процесс уплотнения дисперсных материалов.

Установлено, что при статическом уплотнении гетерофазных увлажненных механических систем с наложением на дисперсную структуру внешнего ультразвукового воздействия в процессе уплотнения создается условие гомогенного распределения частиц порошка, в результате чего формируется структурное состояние пористого металла, характеризующееся однородностью.

Распределение давления и плотности по объему прессовки становится более равномерным вследствие снижения трения порошка на деформирующий инструмент, а за счет снижения межчастичного трения достигается более плотная упаковка частиц порошка и, соответственно, более высокая плотность получаемого изделия.

Технология прессования дисперсных железосодержащих порошков с использованием жидкой фазы при получении высокоплотных деталей получила положительную промышленную оценку [5].

На примере детали конструкционного назначения номенклатуры ООО "Димитровградский завод порошковой металлургии" (рис. 2) сопоставлены основные возможные технологии (табл. 1) изготовления тяжелонагруженных деталей (химический состав материала изделия, % мас.: 4,5...5,5 Cu; ⩽0,25 C; Fe – остальное (основа); годовая программа А = 300 тыс. шт.).

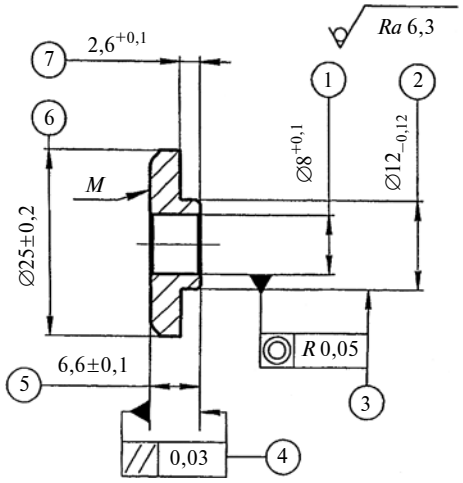


Рис. 2. Деталь № 2101-2905628-20 "тарелка ограничительная выпускного клапана поршня амортизатора передней подвески"

В соответствии с разработанным классификатором деталей конструкционного назначения и способов их получения (см. рис. 1) в табл. 1 рассмотрены основные технологические схемы, используемые в порошковой металлургии при получении деталей низкой пористости.

Для расчета экономического эффекта применения различных технологий получения высокоплотных порошковых деталей применяли метод приведенных затрат [6]. Годовой экономический

1. Структура технологий изготовления порошковых деталей низкой пористости

№ п/п	Технология	Основные операции	Остаточная пористость, %	Масса исходной шихты, г
1	Однократное прессование и спекание	Смешивание, формование, спекание	20	13,28 (основа)
2	Двухкратное прессование (допрессовка) и спекание	Смешивание, формование, спекание, допрессовка	5...10	
3	Высокотемпературное динамическое прессование	Смешивание, формование, нагрев + выдержка, прессование	⩽3	
4	Высокотемпературное гидравлическое изостатическое прессование	Смешивание, нагрев + прессование	⩽1	
5	Интенсивное прессование увлажненных смесей (ультразвук)	Смешивание, формование + ультразвуковое спекание		14,61 (13,28 (основа) + + 1,328 (10 % H_2O))
6	Интенсивное прессование увлажненных смесей (развитые сдвиговые деформации)	Смешивание, формование, спекание		16,23 (14,75 (основа) + + 1,475 (10 % H_2O))

2. Сравнительный анализ затрат, руб., при производстве тяжелонагруженных высокоплотных порошковых деталей по базовой и проектной технологиям

Статья расходов	Анализ базовой (2-я, 3-я) и проектной (5-я, 6-я) технологий			
	2-я / 5-я	2-я / 6-я	3-я / 5-я	3-я / 6-я
Основные материалы	159 360 / 159 362,4	159 360 / 177 002,6	159 360 / 159 362,4	159 360 / 177 002,6
Основная заработная плата основных рабочих	960 000 / 720 000	960 000 / 720 000	960 000 / 720 000	960 000 / 720 000
Премии основных рабочих	288 000 / 216 000	288 000 / 216 000	288 000 / 216 000	288 000 / 216 000
Дополнительная заработная плата	124 800 / 93 600	124 800 / 93 600	124 800 / 93 600	124 800 / 93 600
Отчисления во внебюджетные фонды с зарплаты основных рабочих	398 112 / 298 584	398 112 / 298 584	398 112 / 298 584	398 112 / 298 584
Возмещение износа инструмента	923 400 / 688 332	923 400 / 684 532	672 600 / 688 332	672 600 / 684 532
Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования	1 108 080 / 825 998	1 108 080 / 821 438	807 120 / 825 998	807 120 / 821 438
Цеховые расходы	2 880 000 / 2 160 000	2 880 000 / 2 160 000	2 880 000 / 2 160 000	2 880 000 / 2 160 000
Итоговая цеховая себестоимость	6 841 752 / 5 161 876,4	6 841 752 / 5 171 156,6	6 289 992 / 5 161 876,4	6 289 992 / 5 171 156,6
Общезаводские расходы	1 728 000 / 1 296 000	1 728 000 / 1 296 000	1 728 000 / 1 296 000	1 728 000 / 1 296 000
Итоговая производственная себестоимость	8 569 752 / 6 457 876,4	8 569 752 / 6 467 156,6	8 017 992 / 6 457 876,4	8 017 992 / 6 467 156,6
Коммерческие расходы	257 092,6 / 193 736,3	257 092,6 / 194 014,7	240 539,8 / 193 736,3	240 539,6 / 194 014,7
Итоговая полная себестоимость	8 826 844,6 / 6 651 612,7	8 826 844,6 / 6 661 171,3	8 258 531,8 / 6 651 612,7	8 258 531,8 / 6 661 171,3
Годовой экономический эффект	**3 046 196,1**	**1 686 333,3**	**3 041 139,3**	**1 681 681,5**

Примечание. Номера технологий — по табл. 1.

эффект представленных технологий рассчитан по формуле

$$Э = (C_1 + K_1/T_1)\beta - (C_2 + K_2/T_2),$$

где C_1, C_2 – себестоимость годового объема производства по базовому и проектному вариантам соответственно, руб.; K_1, K_2 – капитальные вложения по базовому и проектному вариантам соответственно, руб.; T_1, T_2 – срок эксплуатации оборудования; β – коэффициент эквивалентности для приведения показателей базового варианта к сопоставимому с проектом виду по объему производства (β_A), качественным параметрам ($\beta_{кач}$), фактору времени (β_t):

$$\beta = \beta_A \beta_{кач} \beta_t;\ \beta_A = \frac{A_2}{A_1};$$

$$\beta_{кач} = \frac{П_{кач1}}{П_{кач2}};\ \ \beta_t = \frac{1}{(1+E)^t},$$

где A_1, A_2 – годовые объемы производства по базовому и проектному вариантам соответственно, шт.; $П_{кач1}$, $П_{кач2}$ – показатели качества продукции по базовому и проектному вариантам соответственно; E – норматив приведения; *t* – число лет с момента осуществления вложений до расчетного года.

В табл. 2 представлен анализ статей затрат при производстве тяжелонагруженных деталей по технологиям, приведенным в табл. 1.

Сопоставительный анализ рассматриваемых технологий показал высокую эффективность технологических решений, основанных на использовании интенсивного прессования увлажненных металлических смесей, причем особенно – при наложении ультразвукового воздействия и развитых сдвиговых деформаций. Таким образом, технология, реализующая интенсивное прессование увлаженных смесей в результате ультразвукового воздействия (5-я технология), является оптимальной, позволяющей существенно снизить трудоемкость, материалоемкость и энергоемкость производства.

При выборе технологии прессования увлажненных смесей следует учитывать внешнюю форму изделия. Так, для получения изделия типа "ромб" (с развитыми радиальными элементами детали) целесообразно применять технологию с использованием развитых сдвиговых деформаций (6-я технология), обеспечивающую минимизацию материалоемкости изделия за счет отсутствия дополнительных потерь материала.

Заключение. Анализ существующих технологий получения высокоплотных порошковых деталей показал, что наличие нескольких конкурентных технологий в этой области требует учета их экономической эффективности при организации современных производственных циклов.

При использовании известных и разработке новых порошковых технологий изготовления деталей с низкой пористостью и высокими эксплуатационными свойствами необходимо выполнять комплексный анализ, учитывающий не только качественные и количественные технические параметры, но и экономические показатели перспективности принимаемых решений. Это позволит повысить технологическую обоснованность и экономическую целесообразность проектируемых и используемых производственных процессов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Теория** и практика процесса прессования гетерофазных увлажненных механических смесей на основе железа / В.Н. Кокорин, А.И. Рудской, В.И. Филимонов, Е.М. Булыжев, С.Ю. Кондратьев // Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2012. 236 с.
2. **Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Кокорин В.Н.** Прессование гетерофазных увлажненных порошковых металлических смесей для повышения качества высокоплотных заготовок с использованием метода интенсивного уплотнения // Справочник. Инженерный журнал. 2011. № 6. С. 12–16.
3. **Прессование** гетерофазных увлажненных железных порошков при использовании метода интенсивного уплотнения / А.И. Рудской, В.Н. Кокорин, С.Ю. Кондратьев, В.И. Филимонов, А.В. Кокорин // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2013. № 5 (23). С. 13–20.
4. **Исследование** процесса уплотнения при ультразвуковом воздействии на увлажненную порошковую среду / А.И. Рудской, С.Ю. Кондратьев, В.Н. Кокорин, Н.А. Сизов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 3 (178). С. 148–155.
5. **Промышленная** апробация технологии изготовления высокоплотных деталей номенклатуры ООО "ДЗПМ" с использованием технологии прессования металлического порошка в присутствии жидкой фазы / А.И. Рудской, С.Ю. Кондратьев, А.М. Кожин, В.В. Наумов, В.Н. Кокорин, Н.А. Сизов // Справочник. Инженерный журнал. 2013. № 11. С. 11–14.
6. **Трусова Л.И., Богданов В.В., Щепочкин В.А.** Экономика машиностроительного предприятия: учеб. пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2011. 200 с.

Валерий Николаевич Кокорин, д-р техн. наук;
Сергей Юрьевич Кондратьев, д-р техн. наук,
petroprom2013@yandex.ru;
Александр Михайлович Кожин;
Владислав Александрович Щепочкин, канд. техн. наук;
Николай Александрович Сизов;
Алексей Валерьевич Кокорин

Евгений Александрович Попов

К 100-летию Евгения Александровича Попова (1914—1995)

Евгений Александрович Попов (1914–1995) – выдающийся ученый в области теории обработки металлов давлением. Основатель научной школы технологии листовой штамповки.

В 1940 г. закончил Московский механико-машиностроительный институт им. Н.Э. Баумана (ныне МГТУ им. Н.Э. Баумана) по специальности "Обработка давлением". В июле 1941 г. был командирован в Орск на завод, где работал технологом цеха патронно-гильзового производства. Е.А. Попов был награжден орденом Красной Звезды и медалью "За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.".

В 1946 г. он защитил кандидатскую диссертацию, в 1956 г. – докторскую диссертацию. В 1957 г. в соавторстве с М.В. Сторожевым был опубликован учебник по теории обработки давлением. Учебник был четыре раза переиздан за период с 1957 по 1977 г., переведен на иностранные языки. В 1973 г. Е.А. Попов был удостоен звания лауреата Государственной премии СССР.

С 1974 по 1988 г. Евгений Александрович являлся заведующим кафедрой "Машины и технология обработки металлов давлением" МВТУ им. Н.Э. Баумана, а в начале 1960-х гг. также был по совместительству заведующим кафедрой в Тульском политехническом институте.

В 1975 г. Е.А. Попову было присвоено почетное звание "Заслуженный деятель науки и техники РСФСР".

Под его руководством подготовлено и защищено более 40 кандидатских диссертаций, являлся научным консультантом у 10 докторантов.

Имя Е.А. Попова внесено в книгу Почета МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1982 г.

Е.А. Попов отличался обаянием, очень много помогал своим сотрудникам. Многочисленные его ученики помнят и продолжают его дело.

ООО «Издательство **Машиностроение**», 107076, Москва, Стромынский пер., 4
Учредитель ООО "Издательство Машиностроение". **E-mail: zpm@mashin.ru**
Телефон редакции журнала: (499) 268-47-19, 268-36-54, 268-69-19. **http://www.mashin.ru**
Дизайнер *Поджиботов К.Ю.* Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 12.08.2014. Подписано в печать 22.09.2014. Формат 60 × 88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз".
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.