ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

3ACOTOBNTEJBHUE TPON3BOACTBA B MALLINHOCTPOEHININ

(Кузнечно-прессовое, литейное и другие производства)

Издается с января 2003 г.

Том 17 № 9 сентябрь 2019

Председатель редакционного совета и главный редактор ЛАВРИНЕНКО В.Ю., д.т.н., доц.

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: БЛАНТЕР М.С., д.ф.-м.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. КУХАРЬ В.Д., д.т.н., проф. ЛАРИН С.Н., д.т.н., доц. МОНАСТЫРСКИЙ В.П., д.т.н. МОРОЗ Б.С., д.т.н., проф. МУРАТОВ В.С., д.т.н., проф. НАЗАРЯН Э.А., д.т.н., проф. НУРАЛИЕВ Ф.А., к.т.н., доц. 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. ТРЕГУБОВ В.И., д.т.н., проф. ФИГУРОВСКИЙ Д.К., к.т.н., доц. ШАТУЛЬСКИЙ А.А., д.т.н., проф. ШПУНЬКИН Н.Ф., к.т.н., проф. ЯМПОЛЬСКИЙ В.М., д.т.н., проф. БАСТ Ю., Dr.-Ing. habil., prof. ОЛУНД Э., Dr. Ir. ТУТМАН Т., Dr. Yur.

Ответственные за подготовку и выпуск номера: СЕРИКОВА Е.А. ОРЛОВА А.В.

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-63952 от 09.12.2015

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Пресса России" 39205) или непосредственно в издательстве.

Тел.: (499) 268-47-19, 269-54-96 Http://www.mashin.ru E-mail: zpm@mashin.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Литейное и сварочное производства

Лукашик К.А., Бурцев Д.С., Пономарев А.А., Солохненко В.В. Развитие представ-	
лений о формировании точности отливок, получаемых литьем в формы из холодно-	
твердеющих смесей	387
Лебедев В.А., Голобородько Ж.Г., Драган С.В. Опыт применения источников пита-	
ния разных типов для плазменной резки в судостроении	390

Кузнечно-штамповочное производство

Рассудов Н.В., Головкин С.А. Технологическая схема процесса получения безде-	
фектной структуры на лопатках из титановых сплавов	396
Воронцов А.Л., Балахонцева Н.А. Проблемы изготовления ступенчатых втулок	
с помощью вытяжки по внутренней поверхности	403

Прокатно-волочильное производство

Материаловедение и новые материалы

Информация

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней по группам научных специальностей: 05.02.09 — Технологии и машины обработки давлением; 05.02.10 — Сварка, родственные процессы и технологии; 05.04.11 — Атомное реакторостроение, машины, агрегаты и технология материалов атомной промышленности; 05.16.01 — Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов; 05.16.04 — Литейное производство; 05.16.05 — Обработка металлов давлением; 05.16.06 — Порошковая металлургия и композиционные материалы; 05.16.08 — Нанотехнологии и наноматериалы и в базу данных Chemical Abstracts

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.

SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

BLANKING PRODUCTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

(Press forging, foundry and other productions)

Published since 2003, January

Vol. 17 № 9 September 2019

Chairman of Editorial Committee and Editor-in-chief LAVRINENKO V.Yu.

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

Editorial Assistant SERIKOVA E.A.

Editorial Committee BLANTER M.S. 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. KUKHAR' V.D. LARIN S.N. MONASTYRSKY V.P. MOROZ B.S. MURATOV V.S. NAZARYAN F A NURALIEV FA OVCHINNIKOV V V POVAROVA K B POLETAEV V.A. SEMENOV B I TREGUBOV VI FIGUROVSKY D.K. SHATUL'SKY A.A. SHPUN'KIN N.F. YAMPOL'SKY V.M. BAST Yu. ÖHLUND E. TUTMANN T.

This issue prepared with assistance of specialists: SERIKOVA E.A. ORLOVA A.V.

Journal is registered by Roskomnadzor. The certificate of registration ПИ № ФС 77-63952, December 9, 2015.

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 united catalogue "Pressa Rossi" 39205) or immediately in the edition of the journal.

Ph.: (499) 268-47-19, 269-54-96 Http: //www.mashin.ru E-mail: zpm@mashin.ru

CONTENTS

Foundry and Welding Productions

Forging and Stamping Production

Rolling and Drawing Production

Physical Metallurgy and New Materials

Information

Journal is included into the list of the Higher Examination Board for publishing of competitors for the academic degrees theses in groups of scientific specialties: 05.02.09 — technologies and forming machines; 05.02.10 — welding, related processes and technologies; 05.04.11 — nuclear reactor engineering, machines, units and materials technology of nuclear industry; 05.16.01 — physical metallurgy and heat treatment of metals and alloys; 05.16.04 — foundry; 05.16.05 — plastic metal forming; 05.16.06 — powder metallurgy and composite materials; 05.16.08 — nanotechnologies and in Chemical Abstracts database

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

ЛИТЕЙНОЕ И СВАРОЧНОЕ

ПРОИЗВОДСТВА



УДК 621.74

К.А. Лукашик, Д.С. Бурцев, А.А. Пономарев, В.В. Солохненко (Московский политехнический университет)

Развитие представлений о формировании точности отливок, получаемых литьем в формы из холоднотвердеющих смесей

Описана методика измерения на координатно-измерительной машине модельной оснастки и литейных форм, изготовленных из холоднотвердеющих смесей, для получения отливок колоколов. Проведен анализ влияния геометрических отклонений формообразующих поверхностей на точностные параметры отливок колоколов и их звуковые спектры.

Ключевые слова: литье; холоднотвердеющая смесь; колокол; измерения; анализ звукового спектра.

The measurement technique on the coordinate measuring machine of the model equipment and moulds obtained cold-hardening sands for the bells castings is presented. The analysis of the effect of geometric deviations of forming surfaces on the accuracy parameters of bells castings and their sound spectera is carried out.

Keywords: casting; cold-hardening sands; bell; measurements; sound spectrum analysis.

В качестве экспериментальной отливки использован колокол массой 2 кг. Это уникальное изделие, которое на протяжении нескольких тысячелетий изготовляют с помощью литейных технологий, различающихся применяемыми материалами и технологическими режимами.

В настоящее время производством колоколов занимается около десяти предприятий России, использующих различные методы литья. Все технологии (методы литья) включают в себя общую последовательность операций и процессов: дизайн-проектирование и изготовление модельно-опочной оснастки, изготовление литейной формы, расплавление металла, заливку металла в форму, его кристаллизацию и последующее извлечение отливки из формы. Все перечисленные технологические этапы влияют на формирование точности изготовления отливки, что может существенно изменить ее частотные характеристики. Таким образом, изучение совокупности этих технологических этапов является актуальной научной и технической задачей.

Для получения отливки колокола с заданными геометрическими и частотными характеристиками была создана твердотельная трехмерная модель колокола диаметром 142,3 мм, нотой Соль#3 с частотой 1661 Гц (рис. 1). На трехмерной модели колокола отсутствует корона (подвес), так как она не оказывает никакого влияния на акустические свойства колокола [1].



Рис. 1. Твердотельная трехмерная модель

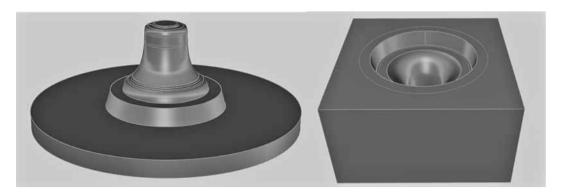


Рис. 2. Трехмерные модели модельной оснастки

Для изготовления отливки колокола выбрана технология литья в формы из холоднотвердеющих смесей (ХТС). С учетом этого на основе трехмерной модели колокола спроектирован комплект оснастки, состоящий из двух модельных плит, для полуформы верха и полуформы низа (рис. 2). Выбранная технология допускает применение безопочных литейных форм, поэтому при проектировании учитывали особенность сборки и центрирование таких форм без направляющих штырей, с помощью замков полуформ.

Для малой партии экспериментальных образцов изготовлять модельную оснастку из металла энергозатратно и невыгодно, а древесина склонна реагировать на перепады температуры и влаги. Поэтому модельную оснастку изготовляли из двух материалов: для подложек и частей замков использовали МДФ, а для моделей, формирующих наружный и внутренний профили, — специальный модельный пластик NECURON 651.

Отливки, изготовленные по этой оснастке, после извлечения из формы и отрезки литниково-питающей системы подвергали только пескоструйной обработке, так как она оказывает минимальное воздействие на поверхность отливки и не способна привести к искажению ее размеров. В верхней части колоколов дополнительно сверлили отверстия диаметром 10 мм. Эти отверстия были необходимы для грамотного представления результатов измерения на координатно-измерительной машине (КИМ) наружного и внутреннего профилей колоколов. Измеренные профили центрируются в программе ГеоКон относительно отверстия, формируя реальное тело полученной отливки относительно трехмерной модели.

Для объяснения процесса формирования точностных параметров готовой отливки были проведены измерения модельной оснастки, литейных форм и опытных образцов колоколов. Все измерения осуществляли на КИМ Inspector MAXI 610V фирмы Olivetti, модернизированной сотрудниками Московского политехнического университета. Модернизация КИМ заключалась в установке современной электроники и вычислительного комплекса. Погрешность измерений КИМ составляет $\pm (4 + (L/250))$ мкм, где L — длина, мм.

Результаты измерений частей модельных плит, оформляющих наружный и внутренний профили колокола, совмещенные с математической моделью, показали, что присутствуют отклонения (рис. 3, см. обложку). Значения синего цвета — отклонения в тело математической модели колокола, т.е. в меньшую сторону (—), красного цвета — наоборот. Разброс отклонений для наружного профиля составляет от -0.092 до 0.279 мм, для внутреннего профиля — от -0.081 до 0.229 мм.

Результаты измерений частей полуформ низа и верха, формирующих внутренний и наружный профиль колокола, на жидкостекольном связующем и смоляном связующем КФ-90 показали одинаковый характер отклонений.

В нижней части полуформы, где формируется максимальный диаметр колокола, отклонения равны 0,086...0,21 мм в большую сторону. Выше по профилю отклонения уменьшаются и составляют 0,01 мм (см. рис. 3).

На всех полуформах верха наблюдаются отклонения в большую сторону. В верхней части профиля отклонения равны 0,09 до 0,1 мм. С увеличением внутреннего диаметра литейной полуформы верха отклонения возрастают и в верхней части составляют 0,4 мм.

Полученные результаты свидетельствуют о всестороннем расширении XTC на жидкостекольном связующем и КФ-90. Данный эффект был установлен в диссертациях А.С. Кофтанникова и В.В. Солохненко [2—6], однако количественных значений найдено не было, так как при литье машиностроительных отливок общего назначения точность десятого порядка несущественна и достигается механической обработкой.

Из результатов измерений опытных образцов колоколов видно, что в верхней части опытного образца внутренний профиль меньше математической модели (в среднем 0,3 мм), а отклонения наружного профиля составляют около 0,4 мм, тоже в меньшую сторону. С увеличением диаметра опытного образца отклонения внутреннего профиля начинают уменьшаться и на высоте первых поясков равны 0,09 мм. Порядок отклонений наружного профиля тоже уменьшается с увеличением диаметра, однако там, где располагаются пояски и чуть выше присутствуют отклонения в большую сторону, что предположительно вызвано высокой шероховатостью поверхности (рис. 4, см. обложку).

Также был проведен анализ звукового спектра полученных опытных образцов колоколов (см. таблицу). Из данных таблицы видно, что частоты нот опытных образцов, отлитых в формы из ХТС на жидкостекольном связующем и КФ-90, схожи.

Все частотные характеристики опытных образцов имеют значения выше заданных (основной тон 1703 Гц). Это связанно с тем, что максимальный диаметр колокола должен

Номер		тные характери кового спектра,	
опытного образца	Основной тон (расчетный 1661)	1-й обертон (расчетный 2217,4)	2-й обертон (расчетный 3332)
1	1703	2306	3449
2	1703	2263	3449
3	1704	2281	3440
4	1703 2328		3470
5	1701 2313		3435
6	1703	2320	3479

быть 142,3 мм, однако в результате оказался равным 142 мм. Это вызывало равномерное повышение всех частот звукового спектра на 43 % относительно проектируемой частоты. Данные выводы также подтверждены численным моделированием.

Заключение. Установлено, что точность изготовления модельной оснастки для производства колоколов и литейных форм из холодно-твердеющих смесей составляет суммарно около 0,3...0,4 мм в верхней части профиля колокола в меньшую сторону относительно математической модели. Данная погрешность увеличивает резонансные частоты колокола, что приводит к их несоответствию относительно частот, заложенных при проектировании колокола. Исследование показало, что всестороннее расширение литейных форм, изготовленных из холодно-твердеющих смесей, необходимо учитывать на стадии проектирования модельной оснастки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. **Бурцев Д.С.** Конструктивное и технологическое обеспечение функционально-эстетических свойств колоколов: дис. ... канд. техн. наук: 17.00.06. Московский государственный университет приборостроения и информатики. М., 2013. 147 с.
- 2. **Солохненко В.В.** Разработка технологии литья по выплавляемым моделям в формы из жидкостекольной холоднотвердеющей смеси с жидким сложноэфирным отвердителем: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.04. Государственный научный центр "ЦНИИТМАШ". М., 2017. 168 с.
- 3. **Формовочные** материалы и технология литейной формы: справочник / С.С. Жуковский, Г.А. Анисович, Н.И. Давыдов и др.; под общ. ред. С.С. Жуковского. М.: Машиностроение, 1993. 432 с.
- 4. **Технология** литейного производства: формовочные и стержневые смеси / под ред. С.С. Жуковского, А.Н. Болдина, А.И. Яковлева, А.Н. Поддубного, В.Л. Крохотина. Брянск: Изд-во БГТУ, 2002. 470 с.
- 5. **Болдин А.Н.**, **Давыдов Н.И.**, **Жуковский С.С. и др.** Литейные формовочные материалы. Формовочные, стержневые смеси и покрытия: справочник. М.: Машиностроение, 2006. 507 с.
- 6. **Жуковский С.С.** Прочность литейной формы. М.: Машиностроение, 1989. 285 с.

Константин Александрович Лукашик; Дмитрий Сергеевич Бурцев, канд. техн. наук, rezon333@yandex.ru;

Алексей Алексеевич Пономарев, канд. техн. наук; Василий Васильевич Солохненко, канд. техн. наук

УДК 621.791.035

В.А. Лебедев

(Институт электросварки имени Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев),

Ж.Г. Голобородько

(Херсонский филиал Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова), С.В. Драган

(Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев)

Опыт применения источников питания разных типов для плазменной резки в судостроении

Рассмотрены схемные решения основных типов серийных источников питания установок для изготовления судовых корпусных деталей плазменной резкой. Приведены требования к статическим и динамическим свойствам источников. Описаны технологические особенности применения простых сварочных выпрямителей на основе трехфазных трансформаторов и сложных, тиристорных, с обратными связями и плавным регулированием тока, а также индуктивно-емкостных со ступенчатым регулированием тока резки. Проанализированы преимущества и недостатки разных источников при использовании их в корпусообрабатывающих цехах судостроительных предприятий. Уделено внимание перспективам применения современных источников питания с инверторными транзисторными преобразователями. Показаны некоторые пути совершенствования технологии плазменной резки за счет частичного изменения конструкции серийного сварочного оборудования.

Ключевые слова: плазменная резка; судостроение; источники тока; применение.

The schematics of basic types of serial power sources of options for making of ship hull parts by plasma cutting are considered. The requirements for static and dynamic properties of power sources are given. The technological features for using of simple welding rectifiers on the basis of three-phase transformers and difficult, thyristor, feedback and variable current control, and also inductive-capacitive with the stepped cutting current control are described. The advantages and disadvantages of different power sources when using of them in hull-processing workshops of shipbuilding enterprises are analyzed. Paid attention to the prospects of using of modern power sources with inverter transistor converters. Some ways for plasma cutting technology advancement due to the partial change in design of serial welding equipment are shown.

Keywords: plasma cutting; shipbuilding; current sources; application.

Введение

Характерная черта современной технологии изготовления корпусных конструкций судна — широкое применение комплексной механизации наиболее трудоемких операций на базе использования высокопроизводительного оборудования с ЧПУ и поточной формы организации производства.

Первым этапом постройки судна является изготовление деталей из листового и профильного проката, число которых достигает нескольких десятков тысяч на один корпус. Листовые детали корпуса судна изготовляют в корпусообрабатывающем цехе (КОЦ) часто с применением механической или термической резки. На долю термической резки по трудоемкости приходится до 20 % всего объема работ КОЦ, а в целом в современном судо-

строении около 80 % металла обрабатывается термической резкой — кислородной, плазменной, электродуговой и лазерной [1]. Плазменная резка в настоящее время — основной способ резки листового проката при изготовлении судовых деталей не только из углеродистых и низколегированных сталей, но и из других металлов, не поддающихся обычной кислородной резке.

Качество изготовления деталей термической резкой и, в первую очередь, обеспечиваемая точность их геометрических размеров и форм, изменение свойств металла в ЗТВ в значительной мере определяют трудоемкость последующих сборочно-сварочных работ и возможность использования при их выполнении автоматизированного оборудования.

Плазменная резка не оказывает отрицательного влияния на качество свободных

кромок сварных соединений. Микротрещин и тем более макротрещин на кромках не обнаруживается.

Детали, полученные плазменной резкой на стационарных машинах, более точны, так как тепловые деформации при резке уменьшаются в 4—5 раз. Опыт сборки криволинейной наружной обшивки секций из листов толщиной 12...18 мм, вырезанных плазменной резкой, показал, что пригоночные работы сокращаются на 50...60 % по сравнению со сборкой деталей, полученных путем ацетилено-кислородной резки [2].

Вместе с тем на качество и производительность плазменной резки существенное влияние оказывает стабильность параметров режима резки, которая определяется типом применяемого источника питания плазменной дуги, его статическими и динамическими характеристиками.

В состав современных установок для плазменной резки входят плазмотрон с вихревой стабилизацией дуги и источник питания с аппаратурой управления процессом резки. При этом стоимость источника питания составляет 20...50 % стоимости всей установки [3—5].

Вихревая стабилизация дуги позволяет, с одной стороны, получить тонкий жесткий столб дуги с размещением его точно вдоль оси мундштука плазмотрона и, с другой — обеспечивает лучшую изоляцию стенок мундштука от плазмы. Обе эти особенности увеличивают стойкость мундштука и время непрерывной работы плазмотрона на повышенных режимах [2].

Схемы управления процессом резки обеспечивают автоматическое возбуждение режущей дуги, плавное нарастание рабочего тока при изменении расстояния между плазмотроном и изделием и возбуждением дуги, снятие напряжения с плазмотрона при нарушениях работы его системы охлаждения, выключение установки при выходе из строя вентиляции. Использование в источниках питания управляемых вентилей позволяет получить максимальное напряжение дуги при минимальных массе и габаритных размерах источника питания [6].

Для обеспечения устойчивого горения дуги при плазменной резке необходимо, чтобы источник питания одновременно удовлетворял определенным требованиям, предъявляемым к его статическим и динамическим характеристикам.

В частности, внешняя вольт-амперная характеристика источника должна быть крутопадающей или вертикальной. Источники питания с такими статическими характеристиками обеспечивают высокую стабильность дуги и позволяют достичь хорошего качества резки. При использовании источников с пологими внешними статическими характеристиками рез получается суживающимся к низу. Это объясняется тем, что углубление дуги в металл сопровождается увеличением напряжения и уменьшением силы тока, вследствие чего в нижних участках реза выделяется меньше теплоты [6].

Определенное влияние на стабильность процесса резки оказывает индуктивность. Если она будет недостаточна, то при резких скачках напряжения на дуге ток может упасть до значения, при котором дуга и резка окажутся нестабильными даже при наличии крутопадающей статической характеристики. При достаточно большой индуктивности резка стабильна даже при сравнительно пологих характеристиках [5, 6].

Наряду со статическими характеристиками очень важны динамические свойства источника питания, определяемые электромагнитными постоянными времени L/R его силовой цепи и цепи управления (L, R — индуктивное и активное сопротивления соответственно). Электромагнитная постоянная времени L/R силовой цепи должна исключать скачкообразное возрастание силы тока при колебаниях напряжения дуги и приводящие к двойному дугообразованию в плазмотронах, а электромагнитная постоянная времени цепи управления должна быть минимальной [5].

Крутопадающие внешние статические характеристики источников питания установок для воздушно-плазменной резки (ВПР) могут быть обеспечены следующими типами источников:

- для ручной резки выпрямителями, построенными по принципу сварочных выпрямителей, но с напряжением холостого хода до 180 В, например типа УПР-203 [1, 3, 4];
- для механизированной ВПР (ввиду повышенных требований к качеству резки) выпрямителями, построенными по принципу управления дросселями насыщения (типа АПР-403), тиристор-

ными выпрямителями с обратной связью по току (типа АПР-404), источниками питания на базе индуктивно-емкостных преобразователей (типа "Киев 4") и транзисторными (инверторными) источниками питания (типа АПР-400К) [1, 3, 4].

Цель работы — раскрытие путей решения проблем, возникающих при использовании источников питания разных типов, удовлетворяющих общим требованиям, при изготовлении судовых деталей плазменной резкой на опыте Херсонского судостроительного завода (Smart Maritime Group).

Схемные решения промышленных источников питания для плазменной резки, в том числе и для судостроения, прошли путь от простых, с использованием серийных сварочных трансформаторов и выпрямителей, до сложных управляемых выпрямителей на тиристорах с обратными связями и плавным регулированием тока или индуктивно-емкостных выпрямителей со ступенчатым регулированием тока резки.

На судостроительных предприятиях для ручной ВПР чаще всего применяют выпрямители, состоящие из трехфазного трансформатора с повышенным магнитным рассеянием и выпрямительного моста, собранного на кремниевых вентилях (рис. 1). Такая конструкция источника питания обусловливает простоту, надежность работы и невысокую стоимость установок, а также удовлетворительные массогабаритные характеристики, что немаловажно в условиях выполнения работ на строящемся судне.

Выпрямители с дросселями насыщения (типа АПР-403 и др.) обладают хорошими регулировочными характеристиками, так же как

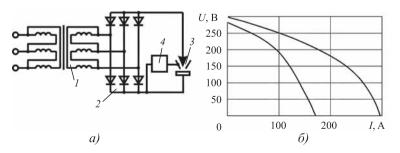


Рис. 1. Принципиальная схема (a) и статическая характеристика (б) выпрямителя для ручной ВПР с разнесенными обмотками трансформатора:

 I— трансформатор; 2 — выпрямительный блок; 3 — плазмотрон; 4 — блок поджига дуги

и указанные выше источники просты в обслуживании и надежны в работе. Но к их недостаткам можно отнести низкое значение коэффициента мощности соѕф, значительные габаритные размеры и массу, обусловленную наличием дросселя насыщения. Не вполне удовлетворительны и динамические характеристики дросселей насыщения, следствием чего является скачкообразное возрастание силы тока при возбуждении плазменной дуги. Используемое в этих источниках питания начальное ограничение тока подмагничивания дросселя насыщения все же не позволяет полностью избавиться от указанного негативного влияния. Установки, оснащенные выпрямителем с дросселем насыщения, длительное время применяли в судостроении для машинной плазменной резки.

Первая машина "Кристалл" ДЛЯ судокорпусных сталей была установлена на Херсонском судостроительном заводе в 1967 г. Источником питания служил выпрямитель ИПГ-500, выполненный по схеме с дросселем насыщения, формирующий крутопадающую внешнюю характеристику и обладающий малой инерционностью. Однако отсутствие обратных связей негативно влияло на стабилизацию параметров режима резки. Не вполне удовлетворительные динамические характеристики дросселя насыщения приводили к скачкообразному возрастанию силы тока при возбуждении дуги. Поэтому возбуждение режущей дуги проводили в три этапа. На первом этапе в течение примерно 1 с возбуждали вспомогательную дугу между электродом и соплом при токе около 40 А. На втором этапе вспомогательную дугу переводили в промежуточную между электродом и изделием, обеспечивая

процесс пробивки разрезаемого металла. Параметры режима пробивки: сила тока 80...100 А; время горения дуги 1...5 с в зависимости от толщины металла. На третьем этапе одновременно с включением движения машины промежуточную дугу переводили в режущую. При этом повышение силы режущего тока осуществляли ступенчато.

При таком способе зажигания дуги на осциллограмме тока наблюдали кратковременные всплески (примерно в 1,5 раза превышающие установившееся значение силы тока) при переходе от одной ступени к дру-

гой. Однако эти всплески, как показал опыт, не сказывались на износе сопла плазмотрона.

Позднее на судостроительных предприятиях источники питания с дросселями насыщения стали вытесняться более экономичными, компактными и легкими тиристорными выпрямителями.

В тиристорных источниках питания типа АПР-404, разработанных в ИЭС им. Е.О. Патона, крутопадающие внешние статические характеристики формируются с использованием обратной связи по току нагрузки (рис. 2).

В источниках питания этого типа достаточно просто можно было реализовать режимы плавного изменения силы тока и импульсные режимы, что позволило значительно улучшить технологические возможности выпрямителей и расширить номенклатуру судовых деталей, вырезаемых на стационарных машинах с ЧПУ.

Существенным недостатком данного типа тиристорных выпрямителей является значительная пульсация тока при глубоком регулирова-

нии, что отражается на качестве поверхности реза вырезаемых деталей. Уменьшить пульсации удалось увеличением индуктивности сглаживающего дросселя путем замены штатного дросселя нелинейным дросселем от выпрямителя ВДГИ-302, продолжительное время выпускавшегося фирмой "СЭЛМА" (г. Симферополь). Однако при этом ухудшились условия зажигания плазменной дуги.

В более позднее время в промышленности для плазменной резки начали применять источники питания на базе индуктивно-емкостных преобразователей. В таких преобразователях используются резонансные свойства LC контура, позволяющие получить источник питания с характеристиками, близкими к идеальным. Несмотря на то что индуктивно-емкостные преобразователи позволяют формировать вертикальные внешние характеристики источника питания, наиболее соответствующие требованиям плазменной технологии, они не получили широкого распространения из-за сложности регулирования тока. Ток в индуктивно-емкостном преобразователе практически можно регулировать только изменением питающего напряжения.

На Херсонском судостроительном заводе при изготовлении изделий машиностроительной части судна применяли аппарат "Киев-4" с плазмотроном ВПР-9. В состав аппарата входил источник питания с индуктивно-емкостным преобразователем (рис. 3), позволяющим выполнять резку только на нескольких фиксированных (100; 200 и 300 A) значениях тока.

Опыт эксплуатации аппарата "Киев-4" показал, что использование плазмотрона со стандартным соплом диаметром 3 мм приводит к резонансу в системе индуктивно-емкостного преобразователя и резка становится практически невозможной. Увеличение диаметра сопла до 3,5 мм исключает явление резонанса и процесс резки проходит устойчиво.

Несмотря на указанную проблему, а также на необходимость применения в индуктивно-емкостных преобразователях силовых конденсаторов и дросселей, эти источники питания можно считать достаточно эффективными и при использовании их в составе установок

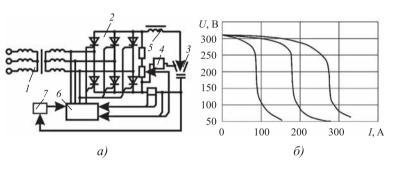


Рис. 2. Принципиальная схема (a) и статическая характеристика (б) тиристорного выпрямителя для механизированной ВПР:

1 — трансформатор; 2 — выпрямительный блок; 3 — плазмотрон; 4 — блок поджига дуги; 5 — сглаживающий дроссель; 6 — фазосдвигающее устройство; 7 — блок управления

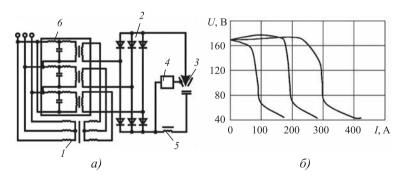


Рис. 3. Принципиальная схема (a) и статическая характеристика (б) выпрямителя на индуктивно-емкостных силовых элементах для механизированной ВПР:

1 — трансформатор; 2 — выпрямительный блок; 3 — плазмотрон; 4 — блок поджига дуги; 5 — сглаживающий дроссель; 6 — индуктивно-емкостной преобразователь

для механизированной плазменной резки на участках КОЦ судостроительных предприятий. Установки воздушно-плазменной резки типа АПР и "Киев-4", выпускавшиеся в СССР, остаются еще в эксплуатации на многих промышленных предприятиях Украины и других стран СНГ.

Новые возможности плазменной резки при изготовлении деталей судового корпуса из листового проката обусловлены применением в настоящее время источников питания с инверторными транзисторными преобразователями. Инвертирование с помощью мощных транзисторов выпрямленного сетевого напряжения позволяет многократно снизить массогабаритные показатели и материалоемкость выпрямителей в широком диапазоне мощностей, обеспечить любые их характеристики, плавное регулирование тока, хорошие динамические свойства и высокий КПД.

На вход инверторного источника питания (рис. 4) подается переменное напряжение питающей сети промышленной частоты, которое поступает на первичный низкочастотный неуправляемый выпрямитель и после выпрямления и фильтрации преобразуется инвертором в переменное напряжение повышенной частоты 20...60 кГц. В качестве инвертирующих элементов используются полевые транзисторы с изолированным затвором (MOSFET) или биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT).

Силовым высокочастотным трансформатором, включенным между инвертором и вторичным неуправляемым высокочастотным выпрямителем, осуществляется трансформация напряжения на повышенной частоте, что существенно позволяет снизить размеры и массу трансформатора.

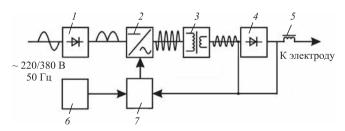


Рис. 4. Блок-схема инверторного источника питания:

1— первичный низкочастотный выпрямитель; 2— инверторный преобразователь; 3— силовой трансформатор; 4— вторичный высокочастотный выпрямитель; 5— стабилизирующий дроссель; 6— блок управления; 7— блок обратной связи

Формирование внешних характеристик и регулирование тока резки осуществляются блоками управления и обратной связи.

Примером новых инверторных транзисторных источников питания служат источники типа АПР-400К, входящие в состав автоматизированных комплексов для воздушноплазменной и кислородно-плазменной резки. Источники этой серии обеспечивают дистанционную регулировку тока нагрузки; автоматическое включение и выключение дежурной дуги; стабилизацию тока резки при изменениях напряжения в сети и изменении нагрузки; защиту от короткого замыкания в нагрузке; плавное нарастание тока резки при поджиге дуги.

Благодаря принципиально новой конструкции данные источники обладают массой и габаритными размерами в 6—9 раз меньшими, чем выпускаемые ранее. Они имеют коэффициент мощности 0,95...0,98, более высокий КПД, высокие динамические свойства, благодаря чему их можно считать перспективными для применения в КОЦ судостроительных предприятий.

Широкое применение мощных инверторных преобразователей в сварочной технике пока сдерживается относительно дорогими силовыми высокочастотными транзисторами и диодами, однако в установках для плазменной резки и других видов плазменной обработки их применение можно считать оправданным.

В последние годы в связи с активизацией деятельности предприятий по изготовлению металлоконструкций возобновилось производство координатных машин с компьютерным управлением и других видов машин термической резки, обеспечивающих качество и точность вырезаемых заготовок. Возникла также потребность в модернизации подобных машин, находящихся в эксплуатации.

Во многих случаях эти машины оснащены установками плазменной резки типа АПР, "Киев-4" и другими, выпускавшимися в СССР, или современными зарубежными установками.

Установки типа АПР и "Киев-4", рассчитанные на резку металла больших толщин на токе 300 А, не позволяют выполнять качественную резку листов малой и средней толщины (1...30 мм), а импортные установки оснащены дорогостоящими резаками и источниками пи-

тания, ремонт которых связан со значительными затратами на поставку деталей из-за рубежа.

Государственным предприятием "НТЦ "Плазмотрон" ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины разработано и организовано производство машинных воздушно-плазменных резаков, обеспечивающих высокое качество и точность резки в широком диапазоне толщин. В случае поставки этих резаков на машины, оснащенные установками АПР или "Киев-4", наряду с некоторой модернизацией источников питания установок, обеспечивается качественная резка металлов малых и средних толщин на экономичных режимах с низким потреблением электроэнергии [5].

Заключение. Схемные решения источников питания плазменной резки, используемые в судостроении, прошли путь от простых серийных сварочных выпрямителей, до сложных тиристорных выпрямителей с обратными связями и плавным регулированием тока или индуктивно-емкостных выпрямителей со ступенчатым регулированием тока резки. Новые возможности технологии плазменной резки обеспечивают источники питания с инверторными транзисторными преобразователями.

Усовершенствование технологии плазменной резки при изготовлении деталей судовых корпусных конструкций может быть достигнуто принципиально двумя путями:

1) за счет оснащения широко применяемого серийного оборудования с индуктивноемкостными преобразователями плазмотронами с увеличенным диаметром сопла, исключающим явление электрического резонанса, либо применения машинных воздушно-плазменных резаков, разработанных Государственным предприятием "НТЦ "Плазмотрон" ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, позволяющих выполнять резку с высоким качеством и точностью в широком диапазоне толщин;

2) применением инверторных транзисторных источников типа АПР-400K, обеспечивающих полную автоматизацию резки с высокой производительностью процесса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. **Эсибян Э.М.** Воздушно-плазменная резка: состояние и перспективы // Автоматическая сварка. 2000. № 12. С. 6—16, 20.
- 2. **Официальный** сайт Государственного предприятия "НТЦ "Плазмотрон" ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. Режим доступа: http://plasmennaya-rezka. kiev.ua (дата обращения 22.01.2019).
- 3. Голобородько Ж.Г., Квасницкий В.В. Плазменная резка в судостроении. Херсон: ТОВ "ВКФ "СТАР ЛТД", 2018. 128 с.
- 4. **Голобородько Ж.Г., Драган С.В.** Источники питания для плазменной резки // Сварка и металлоконструкции. 2017. № 3. С. 16—18.
- 5. Головченко В.С., Доброленский В.П., Мисюров И.П. Тепловая резка металлов в судостроении. Л.: Судостроение, 1975. 272 с.
- 6. **Ширшов И.Г., Котиков В.Н.** Плазменная резка. Л.: Машиностроение, 1987. 192 с.

Владимир Александрович Лебедев, д-р техн. наук, office@paton.kiev.ua;

Жорж Гаврилович Голобородько, канд. техн. наук; Станислав Владимирович Драган, канд. техн. наук

КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО



УДК 621.735.34

Н.В. Рассудов, С.А. Головкин (ПАО "ОДК-Сатурн", г. Рыбинск)

Технологическая схема процесса получения бездефектной структуры на лопатках из титановых сплавов

Рассмотрены вопросы изготовления титановых лопаток компрессора газотурбинного двигателя на электровинтовых прессах. Выполнен анализ факторов, влияющих на получение бездефектной структуры. Разработаны рекомендации по подбору режимов штамповки лопаток.

Ключевые слова: титан; лопатка газотурбинного двигателя; штамповка; микроструктура.

The issues of manufacturing of titanium blades for gas turbine engine compressor on electric screw presses are considered. The analysis of factors affecting on the receipt of defectless structure is performed. Recommendations on the selection of blades forging modes are developed.

Keywords: titanium; gas turbine engine blade; stamping; microstructure.

Самой массовой деталью *газотурбинных* двигателей (ГТД) являются лопатки компрессора и турбины, поэтому надежность двигателей в значительной степени зависит от надежности работы лопаток, которые испытывают циклические термические напряжения и подвергаются воздействию статических и динамических нагрузок.

Лопатки компрессора должны обеспечивать надежность, качество и требуемый ресурс. При возрастающих объемах производства двигателей особое внимание уделяется внедрению передовых прогрессивных технологических процессов изготовления титановых лопаток компрессора с обеспечением высокой экономической эффективности [1].

Наиболее производительным процессом, легко поддающимся автоматизации, является горячая штамповка на электровинтовых прессах стальных и титановых лопаток компрессора. Такая роботизированная автоматическая линия штамповки стальных и титановых лопаток компрессора, состоящая из карусельной электрической печи, робота нанесения смазки, робота укладки, переноса и извлечения из гравюры штампа внедрена в кузнечном корпусе ПАО "ОДК "Сатурн" (г. Рыбинск).

При внедрении технологического процесса горячей штамповки титановых лопаток компрессора на некоторых лопатках в зависимости от конфигурации деталей при контроле структуры лопаток на операции дефектоскопического травления наблюдали дефекты структурной неоднородности в виде белой полосы внутри профиля пера (рис. 1), что является недопустимым дефектом.

Данный вид дефектов относится к дефектам структурной неоднородности, которые нельзя устранить дополнительной термической обработкой или слесарной зачисткой, также он негативно влияет на механические свойства лопаток, что снижает их эксплуатационные свойства. В связи с этими причинами лопатки с подобными дефектами бракуют и отсутствие данного дефекта указывают в нормативной документации по контролю лопаток.

Природа появления структурного дефекта в виде белой полосы различна. На его возникновение влияют следующие причины [2—4]: температура нагрева заготовки; большие степени деформации; высокое граничное поверхностное трение заготовки по штампу из-за высокой шероховатости гравюры; низкая температура штамповой оснастки; низкая темпе-

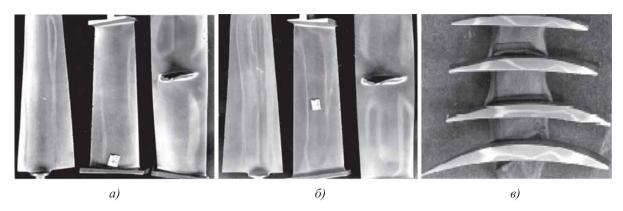


Рис. 1. Полосчатость на профиле пера лопаток, изготовленных из сплава ВТ6: a — со стороны спинки; δ — со стороны корыта; δ — в поперечном направлении

ратура полиморфного превращения конкретной плавки; качество защитно-смазочных покрытий заготовки и гравюры штампа и др.

Рассмотрим типовую схему штамповки лопатки ГТД. При штамповке лопаточного профиля происходит заполнение гравюры штампа от центра к входной и выходной кромке и через облойный мостик в облойную канавку. Металл заготовки течет с разными скоростями и чем ближе к кромке, тем разность между серединой профиля и ее поверхностью становится больше, так как все указанные факторы оказывают негативное влияние. В этом случае происходит увеличение разности скоростного истечения материала по поверхности и в середине профиля. Эта разница становится больше при приближении штампов к оформлению заданной толщины профиля пера штамповки, что приводит к еще большей деформационной неоднородности.

Характер распределения полосчатости по профилю пера лопаток в основном зависит от конфигурации детали и при сохранении внешних факторов остается постоянным.

Основной причиной ярко выраженной интенсивности линий течения на профильных лопатках являются различные скорости течения металла поверхности и сердцевины, вызванные перечисленными выше причинами, и температурной разностью деформационных слоев профиля пера лопатки.

Микроструктуру пера лопаток исследовали в продольном и поперечном направлениях (рис. 2). На микрошлифах лопаток ближе к поверхности выявлена более мелкозернистая структура, а в центральной зоне — изменение структуры (сдвиг).

Для определения причины возникновения структурной неоднородности в программе QForm-3D было выполнено моделирование процесса горячей штамповки на образцах из титанового сплава TA6V, с различными степенями деформации, из заготовок диаметром 20 мм и длиной L=60 мм с нагрева в электрической печи: 900; 915 и 930 °C и температурой штамповой оснастки 150; 200 и 250 °C без смазки и со смазкой штампа маслом с графитом и заготовок ЭВТ-24 (см. таблицу).

После моделирования приступили к натурным испытаниям данных образцов на электровинтовом прессе.

При проведении анализа деформационного поля на поверхности и в середине образца после осадки на различные степени деформации стало очевидным, что причиной структурной неоднородности может быть высокая внутренняя локальная деформация, убывающая от центра в срединной части к краю образца.

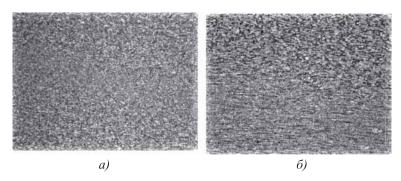


Рис. 2. Микроструктуры пера лопаток из сплава ТА6V (\times 200): a — в продольном направлении вдоль оси OZ; δ — в поперечном направлении

Результаты деформации титановых заготовок из сплава ВТ6 (\varnothing 20 мм, L=60 мм) при осадке

								5 	Степень пеформании	Ормании	%				
Темпе-	Коэф-	Темпе-	Пара- метр (cne-		50			09						80	
дефор- мации, °С	фициент трения	штам- повки, °С						I	Трассирующие линии	цие лини	и				
			образца)	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
			Н, мм	8,06	16,02	21,29	11,85	21,07	27,23	17,45	28,33	36,12	26,96	41,76	52,18
		150	8, 3	75,2	62,5	53,0	83,1	71,5	63,3	88,5	78,8	72,3	97,6	85,6	80,8
	8 0		$K_{ m ne \Phi}$	1,5	1,3	1,1	1,4	1,2	1,1	1,3	1,1	1,0	1,2	1,1	1,0
	o.	Макси- мальная темпе- ратура в	T, °C	954	935	918	6963	943	929	972	954	941	985	996	955
			Н, мм	7,42	15,37	20,83	10,13	19,28	26,08	13,99	25,3	33,98	20,81	36,46	48,03
		200	8, 3	73,0	61,0	52,0	80,3	6,89	61,7	85,7	76,3	9,07	90,4	83,5	79,2
930	0.4		$K_{ m ae \varphi}$	1,5	1,2	1,0	1,3	1,1	1,0	1,2	1,1	1,0	1,1	1,0	1,0
	t.	Макси- мальная темпе- ратура в заготовке	T, °C	951	934	616	958	941	929	996	951	940	978	964	953
			Н, мм	5,49	13,28	18,87	69'9	15,72	22,52	8,53	19,42	27,79	11,83	26,51	37,53
		250	8, 3	63,6	54,8	47,0	70,1	8,19	55,6	76,6	69,1	64,0	83,1	77,4	73,4
	10		$K_{ m ne \Phi}$	1,3	1,1	6,0	1,2	1,0	6,0	1,1	1,0	6,0	1,0	1,0	6,0
	5	Макси- мальная темпе- ратура в заготовке	T, °C	946	933	920	953	941	929	961	950	940	971	962	952
$\begin{array}{c} \text{O60c} \\ \text{e}, \ \textit{K}_{\text{get}} - \end{array}$	значения - максима	Обозначения: $H-$ деформационный изгиб (линейный размер между соответствующими трассирующими линиями); ϵ , ϵ ϵ , ϵ ϵ , ϵ максимальная степень деформации и локальный деформационный коэффициент на изгибе трассирующих линий соответственно.	эрмацион: ень дефор	ный изгис)мации и .	ў (линейнь покальный	ій размер і деформа	между со щионный	ответству: коэффиц:	ющими тр иент на из	ассируюц гибе трасс	ими лини сирующих	лями); к линий сс	ответстве	нно.	

При фиксированной степени деформации цилиндрических образцов от 50 до 80 % локальная внутренняя степень деформации изменяется в сторону увеличения в зависимости от коэффициента трения 0,1 к 0,8.

Из таблицы видно, что деформационная интенсивность проявляется во внутренней центральной части образца по центральным трассирующим линиям (см. результаты линии 1).

При заданной температуре деформации 930 °C в титановом сплаве ТА6V в зависимости от степени деформации и коэффициента трения во внутренней срединной части образца происходит деформационный разогрев, температура которого выше изначальной температуры нагрева образцов и возрастает с увеличением коэффициента трения от 0,1 к 0,8 по всем трассирующим линиям (рис. 3).

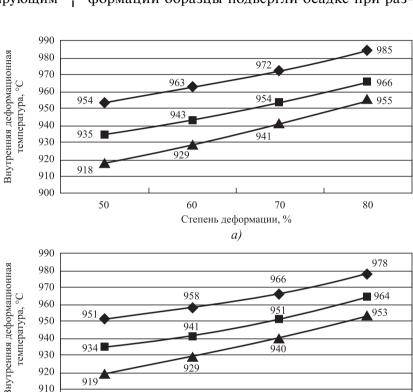
По отштампованным плоским образцам из сплава ТА6V при разных степенях деформации в интервале ковочных температур с различным влиянием внешних условий на процесс деформирования, таких как деформационный внутренний разогрев, возникающий из-за поверхностного подхолаживания материала и более интенсивной проработки внутренних слоев, были определены критические области значений, при превышении которых возникает риск появления структурной неоднородности.

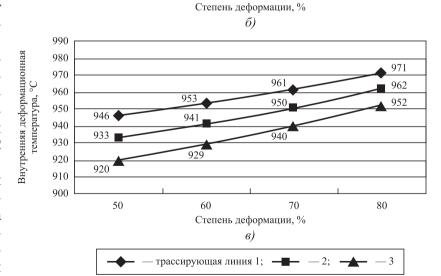
По данным рис. 4 построили трехмерный объемный график с определением по конкретным технологическим условиям штамповки внутреннюю локальную степень деформации в штамповках при температуре 930 °C (рис. 5, a, см. обложку).

Для более полного рассмотрения деформационного поля по осаженным плоским образцам из сплава ТА6V была проведена оценка локальной внутренней деформации в интервале ковочных температур при 900 и 915 °C (рис. 5, δ , ϵ , см. обложку).

По результатам проведенного моделирования в программе QForm-3D выбирали минимально необходимое число вариантов и провели повторно работу на натурных образцах в производственных условиях с выполнением металлургических исследований, подтверждающих по макро- и микроструктуре правильность выбранного варианта, исключающего дефект в виде белой полосы.

Для определения критических степеней деформации образцы подвергли осадке при раз-





60

Рис. 3. График температурного поля по трассирующим линиям (1—3) при деформации с температуры нагрева 930 °C при различных коэффициентах трения:

a - 0.8; $\delta - 0.4$; $\epsilon - 0.1$

900

50

80

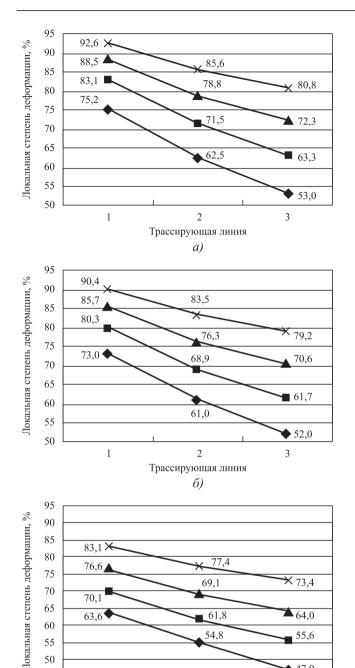


Рис. 4. График деформационного поля по трассирующим линиям (1-3) при осадке образцов с температуры 930 °C при различных коэффициентах трения:

60 %;

Трассирующая линия

B)

$$a - 0.8$$
; $\delta - 0.4$; $\epsilon - 0.1$

1

50

45

личных коэффициентах трения и температурах нагрева штампа, полученные результаты и исходные данные свели в таблицу.

В общем деформационном поле для сплава TA6V при температурах ковки по выявленным параметрам критической степени деформации, вызывающей структурную неоднородность с возникновением дефекта белой полосы, нанесли граничную зону, выше которой нельзя заходить при разработке технологического процесса.

Все полученные результаты свели в диаграмму температурно-деформационных характеристик, выявляющих критические и оптимальные условия выбора нужного варианта штамповки с получением требуемой структуры и нужной окончательной формы профиля.

По двум крайним вариантам: с дефектом структурная полосчатость и без дефекта провели осадку при температуре штампа 150; 200 и 250 °C с различными коэффициентами трения: 0,8 (без смазки заготовки и штампа); 0,4 (со смазкой штампа маслом с графитом) и 0,1 (со смазкой штампа маслом с графитом и заготовки ЭВТ-24).

Результаты найденных границ допустимого критического деформационного поля приведены на рис. 6 (см. обложку).

Данная методика оценки критической степени деформации титановых сплавов в зависимости от деформационного поля позволит на натурных образцах определить условия образования структурного дефекта белая полоса.

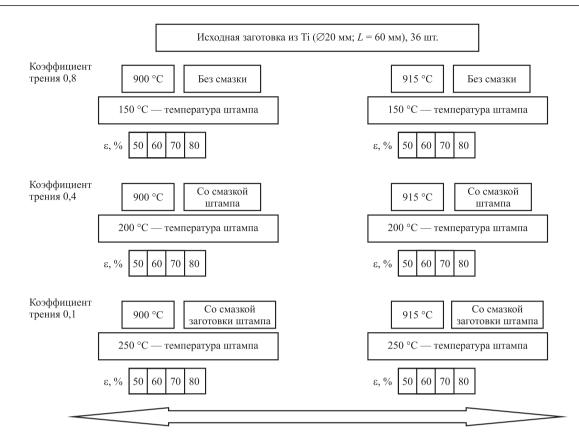
Тогда от деформационных условий штамповки титановых сплавов, таких как температура штамповки, температура штампа, время переноса штамповки из печи в штамп, используемая смазка, изменяется коэффициент трения между штамповкой и штампом и в зависимости от степени деформации могут возникать условия для возникновения белой полосы.

Для большего приближения результатов определения критического деформационного поля с плоскими образцами к результатам оценки лопаточного аэродинамического профиля провели работу на титановом сплаве ТА6V при температуре 930 °C на образцах с лопаточным профилем.

Обозначив данную зависимость, можно точнее определить область значений технологических параметров, недопустимых при назначении рекомендаций для разработки технологий на изготовление штамповок титановых лопаток.

Схема проведения работы в Qform-3D по анализу трассирующих линий, нанесенных по телу исходной заготовки и измененных после выполненной деформации при различных условиях:

♦47,0



Опытную работу провели на пробной штамповке лопатки направляющего аппарата ГТД из материала TA6V на электровинтовом прессе с калибровкой в изотермических условиях на гидравлическом прессе.

Штамповку лопаток выполняли с нагрева в электрической печи при температуре 930 °C ($\tau=20...25$ мин) за один переход при степени деформации $\epsilon=70$ % с последующей изотермической калибровкой.

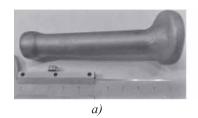
Опытные штамповки лопаток (рис. 7) совместно с серийными штамповками прошли вакуумную термическую обработку с проверкой механических свойств, которые соответствовали требованиям норм для данных лопаток.

Контроль макроструктуры и микроструктуры в продольном и поперечном направле-

ниях пера лопаток выявил изменения в структуре, вызванные условиями деформации при данной штамповке, которые являются недопустимыми по нормативным требованиям для данного вида лопаток (рис. 8).

Штамповки лопаток получились годными по геометрии, механическим свойствам, содержанию водорода, загрязнению посторонними частицами на пере, но по макро- и микроструктуре — недопустимыми по требованиям к ним нормативной документации.

Для определения влияния двухпереходной штамповки на макро- и микроструктуру провели штамповку данной детали за два отдельных перехода со степенями деформации $\varepsilon = 50 \%$ (первый переход) и $\varepsilon = 40 \%$ (второй переход).





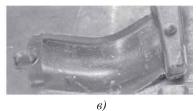


Рис. 7. Лопатка направляющего аппарата ГТД:

a — сфасонированная высадкой заготовка; δ — отштампованная и обрезанная лопатка; ϵ — штамповка после изотермической калибровки

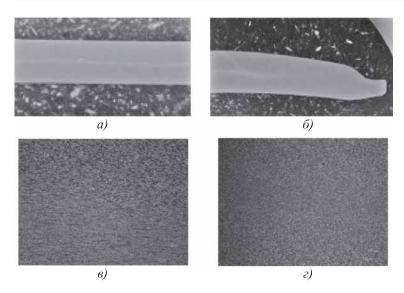


Рис. 8. Макроструктуры (a, δ) и микроструктуры (a, c, $\times 200$) пера лопаток:

 $a, \, e -$ в продольном направлении; $\delta, \, e -$ в поперечном направлении



Рис. 9. Заготовка после предварительной штамповки

Нагрев заготовки перед первым переходом и нагрев предварительно отштампованной заготовки перед вторым переходом проводили при температуре 930 °C ($\tau = 20...25$ мин).

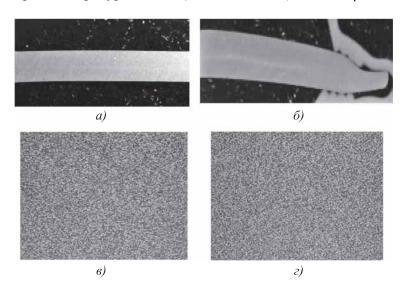


Рис. 10. Макроструктуры (a, δ) и микроструктуры $(a, \epsilon, \times 200)$ пера лопаток после второго перехода штамповки:

 $a, \ e-$ в продольном направлении; $\delta, \ e-$ в поперечном направлении

Заготовка после предварительной штамповки показана на рис. 9.

Контроль макро- и микроструктуры в продольном и поперечном направлениях в штамповке после второго перехода со степенью деформации $\varepsilon = 40~\%$ с наследственной структурой первого перехода с $\varepsilon = 50~\%$ показал, что наблюдаются изменения макроструктуры, вызванные общей степенью деформации при первом и втором переходах (рис. 10). Микроструктура в зоне измененной макроструктуры соответствует требованиям, предъявляемым к данному материалу, поэтому штамповка по измененной макроструктуре второго перехода удовлетворяет требованиям документации.

Заключение. Проведен анализ образования структурной неоднородности (белой полосы) при штамповке титановых спла-

вов на электровинтовых прессах. Выполнено моделирование штамповки в программе QForm-3D варианта возникновения структурной неоднородности и определены граничные зоны образования неоднородности. Данные моделирования подтверждены на практике штамповкой натурных образцов с проведением металлургических исследований. Разработаны рекомендации по корректировке технологического процесса штамповки и изготовлена опытная партия лопаток-образцов, результат положительный.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. **Крымов В.В., Елисеев Ю.С., Зудин К.И.** Производство лопаток газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 2002.
- 2. **Стебунов С.А.** 25 лет программе моделирования процессов обработки металлов давлением QForm // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2016. № 11. С. 3—7.
- 3. Моделирование эволюции крупнозернистой микроструктуры $\alpha + \beta$ титановых сплавов в процессах горячей штамповки с использованием метода конечных элементов / О.И. Быля, П.Л. Блекелл, Р.А. Васин, М.К. Саранджи // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2016. № 11. С. 15—20.
- 4. **Условия** трения при прессовании высокопрочных титановых сплавов и выбор стеклосмазочных материалов / М.В. Славина, М.З. Ермаков, Н.К. Цапалова, С.Д. Афанасьев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 1990. № 5. С. 13—14.

Никита Владимирович Рассудов, businka-g-82@mail.ru; Сергей Алексеевич Головкин УДК 621.73

А.Л. Воронцов, Н.А. Балахонцева

(Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана)

Проблемы изготовления ступенчатых втулок с помощью вытяжки по внутренней поверхности

Получены расчетные формулы, необходимые для успешного проектирования технологического процесса вытяжки по внутренней поверхности, обеспечивающего ее эффективное применение. Высокие точность и надежность расчетных формул подтверждены сопоставлением с экспериментальными данными.

Ключевые слова: вытяжка; внутренняя поверхность полой заготовки; ступенчатая втулка; напряжения.

The design formulas necessary for the successful design of technological drawing process on the internal surface, ensuring its effective use are obtained. High accuracy and reliability of the design formulas are confirmed by comparison with experimental data.

Keywords: drawing; internal surface of hollow bilet; stepped bushing; stress.

Вытяжкой по внутренней поверхности называется операция принудительного уменьшения толщины стенки полой заготовки в зазоре между матрицей и пуансоном путем приложения последним к поверхности отверстия растягивающей силы (рис. 1).

Эта операция является малоизвестной и не входит в фундаментальную классификацию операций малоотходной объемной штамповки, приведенную в справочнике [1]. Как правило, такую вытяжку считают частным случаем отбортовки, т.е. относят к листовой штамповке и называют отбортовкой с утонением стенки или комбинированной отбортовкой [2]. Такие названия неразрывно связывают рассматрива-

емую операцию с частным вариантом получения исходной заготовки и сужают представление о возможном применении данной операции.

Однако вытяжка по внутренней поверхности является высокоэффективной операцией, которую можно применять при получении исходных заготовок методами объемной штамповки, и которая позволяет при объемной штамповке получать разнообразные изделия при сравнительно малых удельных силах деформирования (рис. 2).

Традиционное отнесение операций вытяжки с утонением стенки (вытяжки по наружной поверхности) и вытяжки по внутренней поверхности к листовой

штамповке не вполне правомерно. Типичными операциями листовой штамповки являются операции, в которых толщина листа изменяется в процессе деформации самопроизвольно, т.е. как возможная реакция металла на процесс силового воздействия. Фактическим результатом всех этих процессов является то, что окончательные изменения толщины листа в тех или иных местах и направлениях происходят самопроизвольно и размерами штампового инструмента не гарантируются.

Но в процессе вытяжки с утонением стенки по наружной и внутренней поверхностям изменяются не только размеры или форма (с учетом возможности получения кониче-

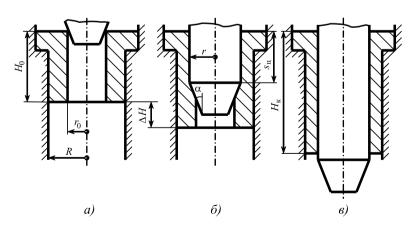


Рис. 1. Вытяжка по внутренней поверхности:

a — заготовка до пластической деформации; δ — процесс вытяжки по внутренней поверхности; ϵ — окончание процесса вытяжки по внутренней поверхности

ских или иных переходов) в продольном направлении, но происходит и гарантированное принудительное изменение размеров и формы по толщине листа, определяемое геометрическими параметрами штампового инструмента. Кроме того, заготовки под данные операции можно получать не только листовой штамповкой, но в большинстве случаев эффективнее получать с помощью высадки и выдавливания (а иногда литья или резания), позволяющих обеспечить намного более разнообразное сочетание геометрических форм и толщин.

Таким образом, операции вытяжки с утонением стенки по наружной или внутренней поверхности являются операциями не листовой, а объемной штамповки и требуют соответствующих методов теоретического исследования.

С помощью вытяжки по внутренней поверхности можно получать различный рельеф не только на внутренней, но и на наружной поверхности (см. рис. 2, a, δ). При этом необходимым условием для заполнения полости матрицы, образующей наружный рельеф, является соотношение (см. рис. 2, a)

$$r > \sqrt{R_1^2 - R^2 + r_0^2} \tag{1}$$

или

$$R_1 < \sqrt{R^2 + r^2 - r_0^2}, \tag{2}$$

где r — радиус пуансона; R_1 — максимальный радиус заполняемого наружного рельефа;

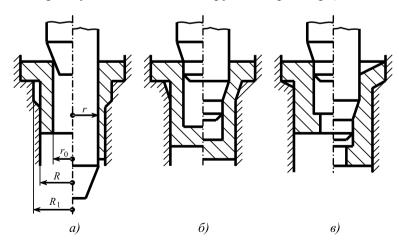


Рис. 2. Варианты применения вытяжки по внутренней поверхности: a — получение внешней ступенчатой поверхности изделия; δ — получение внешней ступенчатой поверхности изделия с глухим отверстием; ϵ — получение изделия со ступенчатой внутренней поверхностью

R — внешний радиус изделия после вытяжки; r_0 — начальный радиус внутренней части заготовки.

Однако выражения (1) и (2) не являются достаточными условиями, гарантирующими заполнение рельефа на наружной поверхности, поскольку течение металла возможно не только в радиальном, но и в осевом направлении.

Вытяжка по внутренней поверхности может быть сквозной (см. рис. 1, θ) или частичной (см. рис. 1, δ).

Высоту изделия после сквозной вытяжки определяют по формуле

$$H_{K} = \frac{\left(R^2 - r_0^2\right) H_0}{R^2 - r^2},\tag{3}$$

 H_0 — высота заготовки.

Частичная вытяжка позволяет получить изделие со ступенчатой внутренней поверхностью. В этом случае приращение высоты изделия (см. рис. $1, \delta$):

$$\Delta H = \frac{3(r^2 - r_0^2)s_{II} + (r - r_0)(r^2 + rr_0 - 2r_0^2)\operatorname{ctg}\alpha}{3(R^2 - r_0^2)}, (4)$$

где $s_{\text{ц}}$ — глубина внедрения цилиндрической части пуансона; α — угол конусности.

Частичная вытяжка в ряде случаев позволяет заменить операцию выдавливания ступенчатым пуансоном (см. рис. 2, δ , ϵ), требующую создания высоких удельных сил и приводящую, как правило, к низкой стойкости пу-

ансона [4]. При частичной вытяжке для предотвращения образования внутреннего наплыва в нижней части очага пластической деформации заходную часть пуансона лучше делать не конической (см. рис. 2, δ), а с небольшим цилиндрическим участком, выполняющим функцию оправки (см. рис. 2, δ , ϵ).

Если матрица препятствует расширению фланца (см. рис. 1), то на начальном этапе вытяжки в зоне фланца сила деформирования будет существенно превосходить силу, необходимую для последующего этапа вытяжки в зоне втулочной части. Верхнюю оценку силы на этапе вытяжки в зоне фланца можно сделать по формулам раздела 8.6 монографии [3]. Для уменьшения силы процесса на данном этапе можно осуществлять

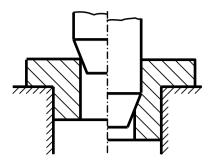


Рис. 3. Вытяжка по внутренней поверхности без ограничения диаметрального расширения фланца

вытяжку без ограничения диаметрального расширения фланца (рис. 3). В этом случае потребную силу можно определить по формулам раздела 16.6 работы [5]. Уменьшению силы на этапе вытяжки в зоне фланца способствует и наличие различных заполняемых полостей (см. рис. 2).

В зависимости от имеющегося кузнечнопрессового оборудования и типоразмеров получаемого изделия (например, изделие со сквозным отверстием на рис. 1, в или стакан на рис. 2, δ) исходную заготовку для вытяжки можно получать различными способами: высадкой, контурной осадкой, радиальным выдавливанием, прямым выдавливанием на оправке. Для уменьшения потребной силы деформирования можно использовать и прямое выдавливание без оправки (рис. 4, где v_o — скорость перемещения деформируемого металла), вариант которого с использованием заготовки в виде тора рассмотрен в работе [6]. Верхнюю оценку силы такого выдавливания можно сделать по формуле из раздела 8.1 монографии [4]. Из-за сдерживающего влияния выдавленной втулочной части, противодействующего радиальному течению металла из фланца (см. рис. 4), на боковой наружной

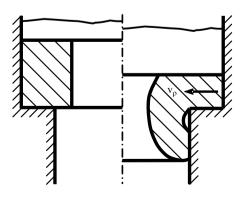


Рис. 4. Получение заготовки для вытяжки прямым выдавливанием без оправки

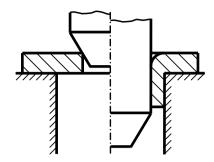


Рис. 5. Совмещение вытяжки по внутренней поверхности с отбортовкой

поверхности заготовки образуется поднутрение, которое, как правило, устраняется при последующей вытяжке по внутренней поверхности.

Иногда требуемое изделие можно получить традиционным совмещением вытяжки по внутренней поверхности с отбортовкой (рис. 5). При таком способе в зоне перехода фланца в отверстие образуется заметная воронка. Она, как правило, образуется и при получении исходной заготовки с помощью способа, показанного на рис. 4. При других способах реализации вытяжки по внутренней поверхности (см. рис. 1—3) скругление зоны перехода существенно уменьшается.

В основе известных теоретических исследований вытяжки по внутренней поверхности [6] лежит решение Е.А. Попова, полученное методом баланса работ для обычной вытяжки с утонением стенки. Недостатки этого решения подробно рассмотрены в разделе 12.7 монографии [3].

Для нового решения используем соотношения наиболее общей на современном уровне теории пластического течения.

Расчетная схема вытяжки по внутренней поверхности показана на рис. 6. Очаг пластической деформации сосредоточен в зоне I, ниже которой расположена исходная часть заготовки 2, а выше — протянутая часть заготовки 3.

Принимаем следующие допущения: материал — жесткопластический; упрочнение учитываем средним по очагу пластической деформации напряжением текучести σ_s ; силы контактного трения определяем по закону Зибеля: $\tau_{\rm K} = \mu \beta \sigma_s$, где μ — коэффициент трения по напряжению текучести; β — коэффициент Лоде.

В анализе используем относительные значения напряжений, отнесенные к среднему напряжению текучести σ_{c} .

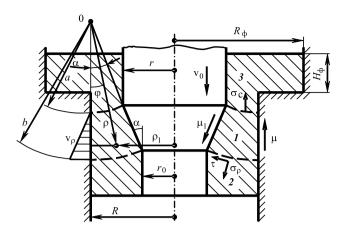


Рис. 6. Расчетная схема вытяжки по внутренней поверхности

Рассмотрим зону *1*. При рассмотрении пластического течения в аналогичной зоне в разделе 6.3 работы [3] путем анализа объемной задачи с использованием торовой системы координат математически обосновано, что при обычно применяемых на практике углах $\alpha \le 20^\circ$ скорость тангенциальной деформации $\xi_\theta \approx 0$, т.е. рассматриваемую задачу можно считать плоской. Поэтому в решении используем полярные координаты ρ и ϕ .

Следуя разделу 6.3 работы [3], можно показать, что напряженное состояние в зоне 1определяется выражениями

$$\begin{cases}
\sigma_{\rho} = \beta + (C - \beta) \ln \rho + C_2, \\
\sigma_{\varphi} = (C - \beta) \ln \rho + C_2, \\
\tau_{\varphi \rho} = -C \varphi + C_1,
\end{cases} \tag{5}$$

где C, C_1 , C_2 — произвольные постоянные интегрирования.

Эпюру скорости перемещения деформируемого металла v_{ρ} по поверхности матрицы с достаточной для практики точностью можно считать линейной (см. рис. 6, слева). Тогда в соответствии с доказательством раздела 14.3 работы [5] следует принять, что сила контактного трения по матрице определяется не коэффициентом трения μ , а его половиной. С учетом этого произвольные постоянные C и C_1 находятся из граничных условий: $\tau_{\phi\rho}=0.5\beta\mu$ при $\phi=0$ и $\tau_{\phi\rho}=\beta\mu_1$ при $\phi=\alpha$, откуда:

$$C = \beta(0.5\mu - \mu_1)/\alpha; C_1 = 0.5\beta\mu,$$
 (6)

где μ_1 — коэффициент трения по пуансону.

Вследствие изменения направления скорости движения материала в зоне 2 по отноше-

нию к v_{ρ} в зоне I на границе между ними возникает разрыв в касательных составляющих скоростей, приводящий к резкой локализации сдвиговых деформаций и, соответственно, к появлению предельных касательных напряжений $\tau=0.5\beta$. Аналогичные условия и на границе между зонами I и S0. С учетом этого произвольную постоянную S1 с определяем из следующего граничного условия:

$$\pi \left(R^2 - r_0^2 \right) \sigma_{\rho} \Big|_{\rho = b} - P_{\tau} \Big|_{\rho = b} = 0, \tag{7}$$

где P_{τ} — сила от действия касательных напряжений; b — расстояние до начала очага пластической деформации.

Первое выражение этого уравнения написано с учетом известной теоремы об определении силы от напряжения, переменного по направлению, но постоянного по величине.

Сила от действия касательных напряжений $\tau = 0.5\beta$:

$$P_{\tau}|_{\rho=b} = 2\pi \int_{r_0}^{R} \tau \sin \varphi \rho_1 d\rho_1 =$$

$$= 2\pi \int_{0}^{\alpha} \tau \sin \varphi (R - b \sin \varphi) b d\varphi =$$

$$= \pi \beta b \left[R(1 - \cos \alpha) - \frac{b}{4} (2\alpha - \sin 2\alpha) \right].$$
(8)

Для упрощения практических расчетов радианное значение угла α в выражениях (6) и (8) в силу малости заменим на $\sin \alpha$. В результате получим:

$$P_{\tau}|_{\alpha=b} = \pi\beta b(1-\cos\alpha)(R-0,5b\sin\alpha). \tag{9}$$

Подставив выражение (9) в уравнение (7), найдем произвольную постоянную C_2 :

$$C_{2} = -\beta - (C - \beta) \ln b + \frac{\beta b (1 - \cos \alpha) (R - 0, 5b \sin \alpha)}{R^{2} - r_{0}^{2}}.$$
 (10)

Напряжение в протянутой части стенки определяем из следующего выражения:

$$\sigma_{c} = \sigma_{\rho}\Big|_{\rho=a} + \frac{P_{\tau}\Big|_{\rho=a}}{\pi(R^{2} - r^{2})}, \tag{11}$$

где a — расстояние до конца очага пластической деформации.

Аналогично выражению (9) можно получить, что

$$P_{\tau}|_{\alpha=a} = \pi \beta a (1 - \cos \alpha) (R - 0, 5a \sin \alpha). \quad (12)$$

Подставив выражения (5), (6), (10), (12) в равенство (11) и учтя, что при плоской деформации $\beta = 1,155$, а из геометрических соображений

$$b = \frac{R - r_0}{\sin \alpha}; \ a = \frac{R - r}{\sin \alpha}, \tag{13}$$

окончательно получим

$$\sigma_{c} = 1,155 \times \left[\left(1 + \frac{\mu_{1} - 0,5\mu}{\sin \alpha} \right) \ln \frac{R - r_{0}}{R - r} + \frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha} \right]. \quad (14)$$

Так как угол конусности α при вытяжке по внутренней поверхности невелик, то деформированное состояние заготовки является стационарным и достаточно равномерным в поперечном направлении. В связи с этим можно вычислить среднее по очагу пластической деформации напряжение текучести по формуле

$$\sigma_s = \frac{\sigma_{s0} + \sigma_{sK}}{2},\tag{15}$$

в которой конечное напряжение текучести σ_{sk} определяется по значению накопленной деформации протянутой части стенки:

$$e_i = 1,155 \ln \frac{R^2 - r_0^2}{R^2 - r^2}.$$
 (16)

Полная сила вытяжки по внутренней поверхности:

$$P = \sigma_s \pi (R^2 - r^2) \sigma_c = 3,63 \sigma_s (R^2 - r^2) \times \left[\left(1 + \frac{\mu_1 - 0.5\mu}{\sin \alpha} \right) \ln \frac{R - r_0}{R - r} + \frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha} \right].$$
 (17)

По выражению (17) из условия $\partial P/\partial \alpha = 0$ можно найти оптимальный угол конусности пуансона, при котором сила вытяжки будет минимальной:

$$\cos \alpha_P = \frac{1}{1 + (\mu_1 - 0, 5\mu) \ln \frac{R - r_0}{R - r}}.$$
 (18)

Из сравнения выражений (14) и (17) видно, что в отличие от вытяжки с утонением стенки при вытяжке по внутренней поверхности найденный оптимальный угол равен оптимально-

1. Изменение оптимальных углов конусности пуансона при вытяжке по внутренней поверхности ($R=40~{
m km};\ r_0=30~{
m km})$

		α_{I}	· ·
<i>r</i> , MM	e_i	$\mu=\mu_1=0,1$	$\mu = \mu_1 = 0.3$
31	0,105	6	10
32	0,225	8,5	14,5
33	0,363	11	18
34	0,526	13	22
35	0,721	15	25

му углу, при котором растягивающее напряжение в стенке протянутой части заготовки минимальное, что, соответственно, позволяет получить максимальную деформацию стенки за один переход.

Вычисленные значения оптимальных углов, представленные в табл. 1, хорошо согласуются с данными работ Ю.А. Аверкиева, Б.В. Башкова (Отбортовка с утонением стенки // КШП. ОМД. 1976. № 9. С. 21—22; Изготовление детали типа втулки с фланцем протяжкой коническим пуансоном из механически обработанной заготовки // КШП. ОМД. 1969. № 7. С. 12—13).

Из табл. 1 видно, что при вытяжке по внутренней поверхности с повышением степени деформации и коэффициентов трения оптимальный угол конусности пуансона также увеличивается.

Поскольку для нормального протекания процесса вытяжки нельзя допускать в протянутой части стенки заготовки появления пластических деформаций, приводящих к ее разрыву, то деформацию за один переход следует ограничивать, руководствуясь условием:

$$\sigma_{\rm c} \leq \frac{\sigma_{\rm sK}}{\sigma_{\rm s}}.$$
 (19)

При вытяжке по внутренней поверхности возможен также срез фланца. Условие отсутствия среза имеет вид (см. рис. 6):

$$2\pi R H_{\Phi} \frac{\sigma_{s0}}{2} > P,$$

где P — полная сила вытяжки по внутренней поверхности.

Отсюда следует, что высота фланца должна удовлетворять соотношению

$$H_{\Phi} > \frac{P}{\pi R \sigma_{c0}}.$$
 (20)

С учетом плоской деформации относительное гидростатическое давление определяется выражением:

$$\sigma = \sigma_\theta = \frac{\sigma_\phi + \sigma_\rho}{2},$$

подставив в которое формулы (5), (6), (10) и (13) при $\rho = a$, где накопленная деформация будет максимальной, получим:

$$\sigma = 0.577 \times \left[2 \left(1 + \frac{\mu - 0.5\mu_1}{\sin \alpha} \right) \ln \frac{R - r_0}{r - r_0} + \frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha} - 1 \right].$$
 (21)

На основе выражений (16) и (21) по методике раздела 12.7 монографии [3] можно прогнозировать трещинообразование при вытяжке по внутренней поверхности.

Для проверки точности полученных расчетных выражений при упрочнении и при его отсутствии была выполнена серия экспериментов по холодной вытяжке заготовок из свинца С1С и алюминиевого сплава АВ. Исходные заготовки получали резанием с размерами (см. рис. 1, 6): R = 20 мм; $H_0 = 30$ мм; $H_{\Phi} = 10$ мм; $R_{\Phi} = 25$ мм. Вытяжку осуществляли по схеме, приведенной на рис. 3, пуансоном с радиусом калибрующей цилиндрической части r = 15 мм и углом конусности $\alpha = 15^\circ$. Исходные радиусы отверстий заготовок r_0 варьировали. Часть свинцовых заготовок смазывали смазкой ЦИАТИМ, другую часть обезжиривали. Все алюминиевые заготовки смазывали животным жиром. Типовые заготовки, полученные после вытяжки со смазкой, показаны на рис. 7. В процессе экспериментов фиксировали максимальные силы на этапе вытяжки втулочной части заготовки. Сопоставления расчетных и экспериментальных данных представлены в табл. 2 и 3.







Рис. 7. Заготовки из различных материалов после сквозной (a, δ) и частичной (a, δ) вытяжки по внутренней поверхности:

a — свинец С1С, r_0 = 12 мм; δ — сплав АВ, r_0 = 12 мм; ϵ — сплав АВ, r_0 = 10 мм

2. Сравнение расчетных и экспериментальных значений силы вытяжки по внутренней поверхности заготовок из свинца C1C

 $(R = 20 \text{ mm}; r = 15 \text{ mm}; \alpha = 15^{\circ}; \sigma_s = 20 \text{ M}\Pi a)$

		=		<i>P</i> , кН		
r_0 , MM	$\mu = \mu_1$	$\sigma_{\rm c}$	Расчет	Эксперимент	δ _B , %	
12		0,800	8,80	8,5	3,4	
13	0,1	0,616	6,77	6,5	4,0	
14		0,403	4,44	4,2	5,3	
12		1,010	11,10	11,5	3,6	
13	0,3	0,766	8,43	8,0	5,0	
14		0,485	5,33	5,1	4,3	

Обозначение: $\delta_{\rm B}$ — расхождение расчетных и экспериментальных значений силы вытяжки.

Смазанная животным жиром заготовка из сплава AB с исходными размерами R=20 мм, $r_0=10$ мм, $H_{\Phi}=10$ мм была подвергнута холодной вытяжке по внутренней поверхности пуансоном с r=15 мм и $\alpha=15$ °. Требуется проверить возможность разрушения заготовки и сравнить расчетное значение силы вытяжки с экспериментальным значением $P_{\Phi}=119$ кH.

С учетом хорошей смазки принимаем $\mu = \mu_1 = 0.1$ и по формуле (14) находим относительное напряжение в протянутой части стенки заготовки: $\sigma_c = 1.107$. Затем по выражению (16) вычисляем накопленную деформацию $e_i = 0.623$. По аппроксимации кривой упрочнения алюминиевого сплава AB [3]

$$\sigma_s = 349 - 163e^{-e_i} - 46e^{-20e_i}$$

находим $\sigma_{sk} = 262$ МПа. При $e_i = 0$ получаем $\sigma_{s0} = 140$ МПа и по формуле (15) находим среднее напряжение текучести $\sigma_s = 201$ МПа. Вычисляем отношение $\sigma_{sk}/\sigma_s = 1,303$ и с учетом выполнения условия (19) делаем вывод, что

разрыва стенки в процессе вытяжки не произойдет. По формуле (17) находим силу вытяжки P=122,27 кН. Сравнивая это значение с экспериментальным, определяем расхождение $\delta=2,7$ %. Далее находим, что правая часть неравенства (20) равна 9,7 мм. Это значение меньше $H_{\Phi}=10$ мм, следовательно, отрыва фланца также не произойдет.

Из заготовок, выполненных из сплава AB и смазанных животным жиром, в соответствии со схемами, приведенными на рис. 2,

					F-1 - 7 7	· , -	, ,
, NO.	_		$\sigma_{s_{\mathrm{K}}}$	σ_{s}	Р,	кН	s 0%
<i>r</i> ₀ , MM	$\sigma_{\rm c}$	e_i	M	Па	Расчет	Эксперимент	$\delta_{_{\mathrm{B}}},~\%$
10	1,107	0,623	262	201	122,27	119	2,7
12	0,800	0,439	244	192	84,45	81	4,1
13	0,616	0,321	231	185	62,76	60	4,4
14	0,403	0,177	211	176	38,94	37	5,0

3. Сравнение расчетных и экспериментальных значений силы вытяжки по внутренней поверхности заготовок из алюминиевого сплава AB ($\mu = \mu_1 = 0.1$; R = 20 мм; r = 15 мм; $\alpha = 15^\circ$)

были получены опытные изделия (рис. 8). Опытная штамповка подтвердила высокую эффективность вытяжки по внутренней поверхности.

Вытяжкой по внутренней поверхности можно не только изготовлять новые детали машиностроения, но и восстанавливать изношенные. Был проведен следующий опыт. Точением из стали 15Х была получена ступенчатая втулка (рис. 9). Допустим, что ответственными поверхностями втулки являются боковые наружные поверхности, которые износились в процессе эксплуатации. Диаметр отверстия втулки по условиям эксплуатации допускает увеличение на 0,6 мм. Это позволяет, расширив отверстие, увеличить диаметры наружных поверхностей, либо сразу получив требуемые параметры геометрии и качества поверхности, либо получив возможность довести их до требуемых с помощью точения или шлифования.

Применению для расширения процесса дорнования препятствуют тонкостенные выступы на верхнем и нижнем фланцах втулки, которые могут быть смяты или потерять устойчивость, поскольку процесс дорнования характеризуется сжатием детали в осевом направлении. В то же время вытяжка по внутреннему диаметру характеризуется растяжением стенки детали без упора в тонкостенные

выступы, т.е. полностью исключает опасность их смятия или потери устойчивости.

Пробная вытяжка позволила получить качественное изделие, показанное на рис. 9. Заготовка из стали 15X с $r_0=14,7\,$ мм и $H_{\Phi}=11\,$ мм была подвергнута холодной вытяжке по внутренней поверхности пуансоном с $r=15\,$ мм и $\alpha=15^\circ$. Радиальный зазор между поверхностями матрицы и наружными поверхностями втулки составлял 0,2 мм. Заготовку смазывали смесью ЦИАТИМ и дисульфида молибдена.

В результате вытяжки радиальный размер наиболее длинного участка боковой поверхности был увеличен от R = 20,0 мм до $R_1 =$ = 20,15 мм. По формуле (16) накопленная деформация $e_i = 0.057$. В соответствии с кривой упрочнения стали 15X [3, с. 594, рис. 9.17] σ_{s0} = = 380 МПа, $\sigma_{sk} = 460$ МПа, т.е. по формуле (15) $\sigma_s = 420$ МПа. С учетом этого при $\mu = \mu_1 = 0.1$ по формуле (17) получаем P = 53,68 кH, что отличается от экспериментального значения $P_{2} = 48 \text{ кH}$ (соответствующей этапу деформации наиболее протяженной ступени втулки с исходным радиусом 20 мм) на величину $\delta = 10,6 \%$. Повышенная величина δ по сравнению с табл. 2 и 3 объясняется тем, что в данном опыте помимо продольного течения имелось значительное перемещение металла в радиаль-



Рис. 8. Заготовки из алюминиевого сплава АВ, полученные вытяжкой по внутренней поверхности в соответствии со схемами на рис. 2



Рис. 9. Заготовка из стали 15X после вытяжки по внутренней поверхности

ном направлении, т.е. была лишняя степень свободы, что, как известно, заметно снижает потребную силу деформирования [3, с. 567].

Качество внутренней поверхности втулки после вытяжки соответствовало получаемому в результате чистового шлифования с применением СОЖ. Повышение механических характеристик в результате упрочнения (предел текучести увеличился с $\sigma_{s0} = 380$ МПа до $\sigma_{sk} = 460$ МПа, т.е. в 1,21 раза, или на 21 %) позволяет прогнозировать существенный рост износостойкости и срока службы такого изделия.

Согласно известным исследованиям сопротивления усталости [7] увеличение перепада предела текучести детали и рабочего напряжения на 10 % позволяет увеличить долговечность работы без разрушения почти в 1,5 раза. Кроме того, высококачественная механическая обработка глубоких отверстий является достаточно трудоемкой операцией, значительно уступающей по производительности вытяжке (по данным Костромского экскаваторного завода замена операции расточки на вытяжку при производстве втулки звена гусеницы экскаватора ЭО 5115 увеличила производительность в 5,5 раза).

Результаты выполненной работы можно использовать для создания современных высокоэффективных технологических процессов изготовления или реновации изделий типа ступенчатых втулок с достаточно сложной формой наружной поверхности.

Технологическая эффективность вытяжки по внутренней поверхности и подтвержденная точность установленных теоретических зависимостей позволяют рекомендовать полученные результаты для практического применения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. **Ковка** и штамповка: справочник. В 4 т. Т. 3. Холодная объемная штамповка. Штамповка металлических порошков / под ред. А.М. Дмитриева. 2-е изд., перераб. и доп. / под общ. ред. Е.И. Семенова. М.: Машиностроение, 2010. 352 с.
- 2. **Ковалёв В.Г., Бодин В.В.** Точность при отбортовке // Заготовительные производства в машиностроении. 2005. № 1. С. 16—21.
- 3. Воронцов А.Л. Теория малоотходной штамповки. М.: Машиностроение, 2005. 859 с.
- 4. Воронцов А.Л. Теория штамповки выдавливанием. М.: Машиностроение, 2004. 721 с.
- 5. Воронцов А.Л. Технологические задачи теории пластичности. Т. 3. М.: Машиностроение, 2006. 475 с.
- 6. **Николаев В.В.** Разработка технологии горячей штамповки фланцев с развитой втулочной частью // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2004. № 6. С. 13—15.
- 7. **Овчинников А.Г.** Основы теории штамповки выдавливанием на прессах. М.: Машиностроение, 1983. 200 с.

Андрей Львович Воронцов, д-р техн. наук, Наталия Андреевна Балахонцева, mt13@bmstu.ru







ООО "Издательство "Инновационное машиностроение" продолжает подписку на журнал

"ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ"

- За наличный и безналичный расчет
- С любого номера и на любой срок
- Без почтовых наценок

Присылайте заказ и обращайтесь за дополнительной информацией в отдел продаж, маркетинга и рекламы:

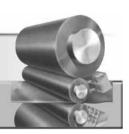
107076, г. Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2,

тел.: (495) 785-6069,

e-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru

ПРОКАТНО-ВОЛОЧИЛЬНОЕ





УДК 621.778

В.А. Харитонов, М.Ю. Усанов, Н.Ю. Сметнёва

(Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова)

Состояние и направления развития волочения проволоки в монолитных волоках

С использованием дополнительной подпрограммы для Deform-3D получены поля распределения коэффициента жесткости схемы Смирнова—Аляева и показателя Лоде—Надаи при волочении проволоки в монолитных волоках. Разработана методика расчета предельного гидростатического напряжения в коническом очаге деформации и установлено, что для каждого рабочего угла монолитной волоки существует область значений фактора неравномерности (дельта-фактор) и диапазон обжатий, при котором обеспечивается минимальная сила волочения. Показано, что применение комбинированного волочения на основе монолитных и роликовых волок дает возможность формирования ультрамелкозернистой микроструктуры с повышением механических свойств проволоки. Предложены новые способы волочения проволоки.

Ключевые слова: волочение; проволока; монолитная волока; роликовая волока; маршрут волочения; гидростатическое напряжение; сила волочения; механические свойства.

The fields for the distribution of the stiffness coefficient of the Smirnov—Alyaev scheme and the Lode—Nadai parameter at drawing of wire in monolithic dies are obtained by using additional subprogram for Deform-3D. Method for calculating of the limiting hydrostatic stress in conical deformation zone is developed and it is established that for each working angle of monolithic die there is range of values for the irregularity factor (delta factor) and range of reductions that ensures the minimum drag force. It is shown that the use of combined drawing on the basis of monolithic and rolling dies makes it possible to form ultrafine-grained microstructure with increase in the mechanical properties of the wire. New ways of wire drawing are proposed.

Keywords: drawing; wire; monolithic die; rolling die; drawing route; hydrostatic stress; drawing force; mechanical properties.

Волочение в монолитных волоках является основным способом производства стальной проволоки. Этот способ позволяет производить проволоку различного назначения в широком диапазоне размеров и свойств.

У волочения долгая история развития и много преимуществ перед другими процессами деформирования: высокая производительность, возможность получения профилей круглого и фасонного сечений высокой точности геометрических размеров и качества поверхности, обеспечение требуемого уровня механических свойств готовой проволоки, незначительные отходы металла (металлосбережение), теоретическая изученность, относительная простота и отлаженность технологического процесса.

Для осуществления волочения применяют разнообразное серийно выпускаемое оборудование, которое непрерывно совершенствуется в направлении интенсификации процесса, увеличения производственной мощности, совмещения операций подготовки поверхности заготовки и волочения, повышения качества готовой проволоки, экономии энергоресурсов, экологичности процесса и т.д. Номенклатура изделий, полученных волочением, непрерывно возрастает.

Наряду с преимуществами волочение имеет и существенные недостатки: неблагоприятная схема напряженно-деформированного состояния в очаге деформации, определяемая растягивающими напряжениями, дополни-

тельный сдвиг поверхностных слоев относительно центральных, являющийся причиной их повышенного упрочнения, и высокое контактное трение на границе металла и волоки, вызывающее нагрев и деформационное старение металла. Поэтому совершенствование процесса волочения в основном заключается в разработке и применении более качественных волочильных смазок и способа их подачи в очаг деформации, улучшении материала и конструкций волочильного инструмента, повышении эффективности охлаждения проволоки и волок [1]. Большое внимание приходится уделять и подготовке поверхности металла к волочению.

К другим недостаткам волочения можно отнести монотонность процесса деформации, неравномерность деформации из-за неполной проработки сечения, значительную зависимость от масштабного фактора.

Результатом влияния всех перечисленных выше факторов является снижение деформируемости металла и его ресурса пластичности.

Потеря пластичности металла в процессе волочения ограничивает предельно допустимые суммарные обжатия, достижение высокого уровня прочности и промышленную реализацию полученного высокопрочного состояния [2].

Все прочностные и пластические характеристики из-за влияния масштабного фактора имеют тенденцию к снижению при увеличении диаметра изготовляемой проволоки. Для холоднотянутой проволоки изменение механических свойств при волочении имеет наиболее важное значение, так как оно обусловливает получение заданного уровня прочностных и пластических характеристик готовой проволоки. Кроме того, пластичность определяет возможность дальнейшей деформации при волочении и при последующей переработке проволоки в изделия.

Поиск альтернативных способов производства показал, что все они, например безфильерное волочение или волочение с наложением ультразвуковых колебаний, несмотря на определенные преимущества не вполне пригодны для массового производства проволоки и поэтому широкого распространения не получили.

Вместе с тем возможности традиционного волочения полностью не исчерпаны. Под-

тверждением этого является разработанный учеными Республики Корея процесс noncircular drawing, или NCD, заключающийся в волочении через последовательно установленные монолитные волоки с круглым и овальным рабочим каналом и обеспечивающий чередование растягивающих и сжимающих напряжений из-за изменения геометрии канала волок, технологическая схема которого приведена на рис. 1 [3]. Экспериментально установлено, что проволока, изготовленная NCD-волочением упрочняется интенсивнее, чем изготовленная традиционным способом. Прирост предела прочности ов составил 10,7 %.

Установлено, что многопроходным NCDBволочением можно изготовлять высокопрочную нерасслаивающуюся стальную углеродистую проволоку с более высоким запасом пластичности, чем при традиционном волочении за счет получения мелкозернистой структуры [4].

Результаты исследований доказывают, что NCD-волочение вследствие накопления энергии деформации позволяет ускорить сфероидизацию перлита в среднеуглеродистой стали при конечной операции отжига [5].

В работах [3—5] на основании моделирования и экспериментального исследования определено, что волочение с комбинированным нагружением позволяет достигнуть большей равномерности распределения пластической деформации по сечению проволоки в сравнении с обычным волочением.

Но при этом остаются все недостатки, присущие волочению: монотонность деформации, определяемая однопоточным течением метал-

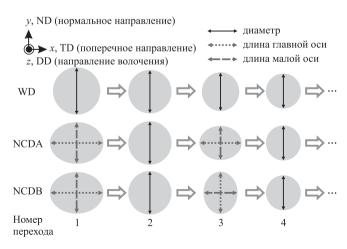


Рис. 1. Принципиальные схемы двух вариантов NCD и стандартного волочения WD

ла, постоянное действие растягивающих напряжений в очаге деформации, высокое контактное трение. Также для реализации данного способа волочения необходим сложный волочильный инструмент — волоки с фасонной формой рабочего канала.

В исследовании [6] показано, что волочение овального профиля через круглую монолитную волоку сопровождается значительной неравномерностью деформации по сечению проволоки. Возникающие при этом напряжения из-за расклинивающего действия овала на волоку могут привести к ее разрушению. Кроме того, при волочении овального профиля через волоку с круглым отверстием на выходе из деформационной зоны наблюдается рост напряжения волочения.

В настоящее время основной задачей является совершенствование процесса волочения в монолитных волоках круглой проволоки, особенно больших диаметров. Для этого проводят оценку напряженно-деформированного состояния для какого-то частного случая или маршрута волочения. При этом оценивают отдельно взятый показатель: дельта-фактор [7—9], рабочий угол волоки [10], диаметр проволоки [11], скорость волочения [12], кри-

терий разрушения [13] и др. Однако необходимо исследовать совместное влияние рабочего угла волоки, единичного обжатия и коэффициента трения в отдельном очаге деформации на напряженно-деформированное состояние, а далее проектировать ресурсосберегающие маршруты волочения.

Таким образом, необходима методика, основанная на системном подходе оценки напряженно-деформированного состояния и силы волочения при различных углах волок, обжатиях и трении с учетом физикомеханических свойств проволоки.

Такая методика оценки напряженно-деформированного состояния проволоки при волочении в инструменте с коническим очагом деформации на основе моделирования [14] разработана на кафедре "Технологии обработки материалов" МГТУ им. Г.И. Носова и приведена в работе [15]. С помощью дополнитель-

ной подпрограммы для Deform-3D получены поля распределения коэффициента жесткости схемы Смирнова—Аляева и показателя Лоде—Надаи при волочении в монолитных волоках заготовки из сталей Ст3 и 80. На их основе и оценке значений гидростатического напряжения в очаге деформации разработана методика оценки напряженного состояния.

По длине конического очага деформации получены для различных обжатий кривые изменения коэффициента жесткости на оси проволоки от значений дельта-фактора:

$$\Delta = \left(\alpha/\epsilon \right) \left(1 + \sqrt{1 - \epsilon} \right)^2,$$

где α — полуугол рабочего конуса волоки, рад; ϵ — единичное обжатие.

Также проведен анализ изменения гидростатического напряжения для стали 80 и разработана методика оценки глубины проникновения конусов скольжения в очаге деформации в зависимости от дельта-фактора для различных значений рабочих углов волок (рис. 2).

Разработана методика расчета предельного гидростатического напряжения в коническом очаге деформации. Для этого введен показа-

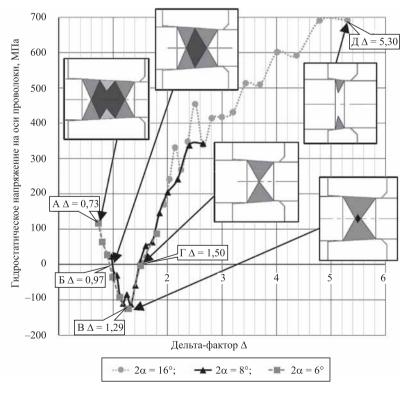


Рис. 2. Изменение гидростатического напряжения на оси проволоки от дельта-фактора для рабочих углов волок $2\alpha = 6$; 8 и 16°

тель $\sigma_1/(\sigma_2 + \sigma_3)$, где σ_1 — осевые напряжения, σ_2 — радиальные напряжения, σ_3 — окружные (тангенциальные) напряжения, и построен график его зависимости от гидростатического напряжения для стали 80.

Показано, что для стали 80 при значении гидростатического напряжения выше 320 МПа в очаге деформации действует схема всестороннего растяжения. Для исключения появления схемы всестороннего растяжения на оси проволоки из углеродистых марок стали рекомендуется предельное значение гидростатического напряжения принимать равным $\sigma_{cp} \leqslant 0.3\sigma_B$.

Также в работе [14] проведено исследование влияния режимов волочения на изменение напряженно-деформированного состояния проволоки в коническом очаге деформации при волочении в монолитных волоках и определены сила волочения и гидростатическое напряжение для всего диапазона применяемых в практике рабочих углов волок ($2\alpha = 6...16^\circ$) и единичных обжатий ($\epsilon = 8...41\%$) для проволоки из стали 80 диаметром 16 мм (рис. 3).

Для рабочего диапазона значений дельтафактора от 1,20 до 2,0 получены зависимости изменения гидростатического напряжения на оси проволоки и силы волочения. Показано, что гидростатическое напряжение на

450 $2\alpha = 6^{\circ}$ 20 % $2\alpha=8^{\circ}$ $2\alpha = 10^{\circ}$ Гидростатическое напряжение на оси проволоки, МПа $2\alpha = 12^{\circ}$ 350 $2\alpha = 14^{\circ}$ ···**≜**·· 2α = 16° 23 % 250 26 % 150 50 120 100 17 % -50 -150Сила волочения, кН

Рис. 3. Связь гидростатического напряжения и силы волочения для рабочих углов волок $2\alpha = 6...16^\circ$ и единичных обжатий $\epsilon = 8...41~\%$

оси проволоки при рабочих углах волок 6; 8 и 10° минимально при дельта-факторе $\Delta = 1,29$, а для рабочих углов 12; 14 и 16° — при $\Delta = 1,40$. Для каждого рабочего угла существует область значений дельта-фактора и диапазона обжатий, обеспечивающая максимальное обжатие при минимальной силе волочения. Рекомендуемые значения обжатий для рассматриваемых рабочих углов волок приведены в табл. 1.

На основе оценки глубины проникновения сжимающих напряжений в очаге деформации в Deform-3D построена кривая изменения площади с растягивающими напряжениями на оси проволоки в зависимости от дельтафактора (рис. 4).

Из рис. 4 видно, что с ростом значения дельта-фактора увеличиваются площадь действия и растягивающее гидростатическое напряжение.

Как показывают практический опыт и проведенные исследования, с повышением диаметра готовой проволоки и соответственно с увеличением диаметра заготовки ухудшается напряженное состояние на оси проволоки вследствие непроникновения деформации, возрастает сила волочения и т.д. Поэтому для повышения эффективности процесса волочения необходимо применять роликовые волоки классические и радиально-сдвиговой протяжки.

Для изменения характера течения металла предложено использовать комбинированный процесс волочения. Создать комбинированное нагружение целесообразно за счет объединения традиционного волочения с другим способом ОМД, имеющим другую схему напряженнодеформированного состояния в очаге деформации. При комбинированном нагружении в результате изменения схем деформации появляется возможность управления напряженно-деформированным состоянием заготовки и получения свойств проволоки, которые недоступны при традиционном способе. Важным преимуществом комбинированных процессов является возможность формирования ультрамелкозернистой микроструктуры

Рабочий угол волоки 2α, °	Диапазон дельта- фактора Δ	Диапазон обжатий, %	Среднее обжатие, %	Диапазон вытяжек	Средняя вытяжка	Сила волочения при минимальном σ_{cp} , кН
6		1016	13,0	1,111,19	1,15	68,4
8	1,22,0	1321	17,0	1,151,27	1,20	77,0
10		1625	20,5	1,191,33	1,26	80,2
12	1,292,0	1928	23,5	1,231,39	1,31	84,2
14	1,332,0	2231	26,5	1,281,45	1,36	87,8
16	1,362,0	2534	29,5	1,331,52	1,42	92,6

1. Рекомендуемые значения обжатий

с повышением механических свойств проволоки [16, 17].

Радиально-сдвиговая протяжка позволяет создать комбинированное нагружение, при этом одновременно реализуются линейная деформация вытяжки и сдвиговая деформация скручивания и можно обрабатывать длинномерные изделия, такие как проволока [18].

Радиально-сдвиговая протяжка — способ получения проволоки радиально-сдвиговой деформацией, который осуществляется приложением к проволоке (катанке) передней тянущей силы без ее скручивания. Радиальносдвиговая протяжка осуществляется в роликовой волоке с тремя неприводными роликами, расположенными под углом 120° друг к другу, с углами подачи $\beta > 16^\circ$ (рис. 5). Каждый ролик имеет рабочий конус и калибрующий поясок.

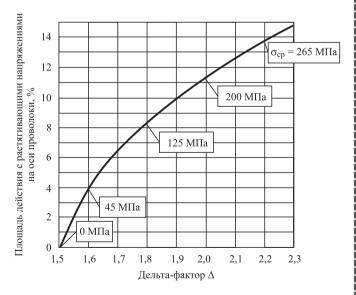


Рис. 4. Зависимость площади действия с растягивающими гидростатическими напряжениями на оси проволоки от изменения дельта-фактора

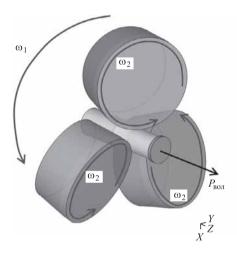


Рис. 5. Принципиальная схема радиально-сдвиговой протяжки:

 ω_1 — угловая скорость вращения роликовой волоки; ω_2 — угловая скорость вращения роликов; $P_{\text{вол}}$ — сила волочения

Волока радиально-сдвиговой протяжки может быть, как и обычная роликовая, установлена на волочильную машину [18].

При исследовании напряженно-деформированного состояния при холодной радиальносдвиговой протяжке установлено, что характер распределения накопленной степени деформации соответствует таковому при волочении в монолитных волоках, но с еще большей ее величиной в поверхности проволоки; из-за вращения роликов вокруг заготовки напряжения действуют циклически, что приводит к геликоидальному характеру течения металла и неоднородности напряженного состояния; с уменьшением угла конической части роликов уменьшается угол скручивания, что приводит к увеличению накопленной степени деформации; за счет уменьшения площади контакта обрабатываемой проволоки с инструментом значительно снижается сила волочения по срав-

Вариант маршрутов волочения	Кратность маршрута волочения	Диапазон дельта-фактора Δ	Суммарная сила волочения, кН/ относительное изменение, %
Монолитные волоки:			
$2\alpha = 12^{\circ}$	5	1,812,72	269/0
$2\alpha = 10^{\circ}$	4	1,221,89	261/-3,0
$2\alpha = 10^{\circ}$	5	1,682,01	282/4,8
P.B. + P.B. + M.B.		0,811,78	152/-43,5
$(PC\Pi p + PC\Pi p) + M.B. + M.B.$	3	0,741,91	153/-43,1
$(PC\Pi p + PC\Pi p) + P.B. + M.B.$		0,781,78	126/-53,2

2. Основные параметры рассмотренных способов волочения

Обозначения: М.В. — монолитная волока; Р.В. — роликовая волока; (РСПр + РСПр) — реверсивная, сдвоенная волока радиально-сдвиговой протяжки.

нению с классическими способами волочения в монолитных и в роликовых волоках.

Способ радиально-сдвиговой протяжки имеет ограничения по максимальному значению единичного обжатия ($\epsilon \le 20$ %) и минимальному углу конической части ролика ($\alpha \ge 2^\circ$). Для осуществления устойчивого процесса радиально-сдвиговой протяжки и получения гладкой поверхности проволоки важно соблюдать соотношение скоростей протяжки заготовки и вращения роликовой волоки: необходимо, чтобы за один оборот роликовой волоки заготовка протягивалась на расстояние не более 1/3 длины цилиндрической части ролика [19].

На примере волочения проволоки большого диаметра проанализировали действующий маршрут волочения круглой проволоки из стали 80 с диаметра 16 мм на диаметр 10 мм (16—14,25—12,85—11,73—10,8—10 мм) [20] (табл. 2).

Анализ табл. 2 показал, что действующий маршрут волочения имеет высокую кратность, высокие значения дельта-фактора и силы волочения, что приводит к неравномерности распределения накопленной степени деформации по сечению проволоки. Попытка повысить проработку металла по сечению проволоки приводит к увеличению силы волочения. Изменить такую ситуацию позволяет использование совмещенных маршрутов волочения с применением роликовых волок.

Применение волок радиально-сдвиговой протяжки также позволяет сократить маршрут волочения до трех протяжек, а в сочетании еще и с роликовой волокой достаточно хорошо проработать все сечение проволоки. При этом сила волочения снижается еще больше, чем при использовании классических роликовых волок. Сдвоенная реверсивная радиально-

сдвиговая протяжка позволяет получить градиентную структуру в проволоке.

Для совершенствования процесса волочения предложен модульно-комбинированный способ волочения стальной проволоки [21]. Схема процесса представлена на рис. 6.

Заготовка круглого сечения *1* протягивается через калибр, образованный четырьмя неприводными роликами с гладкой бочкой *2*. В роликовой волоке формируется промежуточный профиль в виде невыполненного квадрата, который затем деформируется в круг через стандартную монолитную волоку *3*.

Основой процесса является разделение общей деформации за проход на две части, имеющие разные схемы напряженного состояния: всестороннего сжатия в роликовой волоке и преимущественно одноосным растяжением в монолитной волоке. Комбинированное волочение позволяет распределить частные обжатия между монолитной и роликовой волоками так, чтобы можно было повысить частные обжатия и уменьшить число переходов, интенсифицируя технологический процесс.

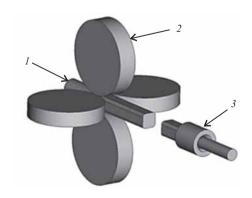


Рис. 6. Схема комбинированного способа волочения

Модули устанавливаются в линию волочильной машины, причем ее переоборудования не требуется и технологический процесс изготовления проволоки остается традиционным. Подготовка поверхности заготовки осуществляется химическим способом или механическим в линии волочильной машины. При использовании данной схемы преобладает линейная деформация вытяжки.

Заключение. Традиционными в настоящее время способами повышения эффективности процесса волочения в монолитных волоках остаются улучшение температурно-скоростных и контактных условий, повышение качества инструмента и технологических смазок, использование нового волочильного оборудования.

Разработаны новая методика и алгоритм расчета маршрутов волочения, обеспечивающие возможность получения проволоки заданного уровня качества при минимальных энерго- и материалозатратах. Данную методику можно применять при проектировании новых и при анализе действующих маршрутов волочения.

Предложены новые способы волочения проволоки, основанные на совмещении монолитных и роликовых волок, позволяющие улучшить качество структуры и снизить затраты на процесс волочения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. **Харитонов В.А., Галлямов Д.Э.** Исследование модульно-комбинированного процесса волочения углеродистой проволоки по схеме "квадрат—круг" // Обработка сплошных и слоистых материалов. 2016. № 2 (45). С. 61—64.
- 2. Фетисов В.И. Пластичность высокопрочной проволоки. М.: Интермет Инжиниринг, 2011. 128 с.
- 3. **The effect** of a non-circular drawing sequence on delamination characteristics of pearlitic steel wire / M.B. Hyun, K.H. Sun, S.J. Ho, I. Yong-Taek, S. Il-Heon, M.B. Chul // Materials and Design. October 2014. Vol. 62. P. 137—148.
- 4. **Manufacturing** of High-Strength and High-Ductility Pearlitic Steel Wires Using Noncircular Drawing Sequence / M.B. Hyun, K.H. Sun, S.J. Ho, I. Yong-Taek, S. Il-Heon, M.B. Chul // Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A. 2014. Vol. 38. № 7. P. 743—749.
- 5. **The effect** of a non-circular drawing sequence on spheroidization of medium carbon steel wires / S.J. Ho, K.H. Sun, M.B. Hyun, I. Yong-Taek, S. II-Heon, M.B. Chul // Journal of Materials Processing Technology. February 2015. Vol. 216. P. 348—356.
- 6. **Харитонов В.А., Галлямов Д.Э.** Выбор рациональной формы промежуточного профиля при изготовлении стальной проволоки совмещенным способом "прокаткаволочение" // Производство проката. 2015. Т. 3. С. 30—33.
- 7. Радионова Л.В. Разработка технологии производства высокопрочной проволоки с повышенными пластическими свойствами из углеродистых марок сталей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05. Магнитогорск, 2001. 24 с.

- 8. Зюзин В.И. Русерсосберегающие технологические процессы изготовления стальной проволоки волочением: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05. Магнитогорск, 2002. 16 с.
- 9. Сафонов Е.В. Повышение эффективности технологии производства высокоуглеродистой проволоки волочением на основе математического моделирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05. Магнитогорск, 2005. 16 с.
- 10. **Даненко В.Ф., Гуревич Л.М.** Влияние угла конуса волоки на напряженное состояние при волочении стальной проволоки // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2016. № 15 (194). С. 63—68.
- 11. Даненко В.Ф., Гуревич Л.М. О влиянии масштабного фактора на напряженно-деформированное состояние деформационной зоны при волочении проволоки в монолитных волоках // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2017. № 10 (205). С. 105—111.
- 12. Головизнин С.М. Совершенствование технологии изготовления высокопрочной проволоки на основе моделирования температурно-деформационных режимов высокоскоростного мокрого волочения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05. Магнитогорск, 2008. 20 с.
- 13. Столяров А.Ю. Разработка конкурентоспособной технологии производства проволоки высокой прочности для армирования автомобильных шин: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05. Магнитогорск, 2013. 118 с.
- 14. **Харитонов В.А., Усанов М.Ю.** Совершенствование методики расчета маршрутов волочения для высокоуглеродистых сталей // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2017. № 8. С. 92—95.
- 15. **Методика** совершенствования и проектирования маршрутов волочения проволоки / М.Ю. Усанов, В.А. Харитонов, Л.Э. Пыхов, Н.Ю. Сметнева // Сталь. 2018. № 6. С. 42—43.
- 16. **Харитонов В.А., Усанов М.Ю.** Состояние и направления развития непрерывных способов наноструктурирования круглой проволоки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. № 3. С. 69—73.
- 17. **Влияние** комбинированных методов обработки на механические свойства углеродистой проволоки / М.В. Чукин, М.А. Полякова, А.Е. Гулин, Д.Г. Емалеева // Черные металлы. 2014. № 12. С. 35—39.
- 18. **Манякин А.Ю.** Повышение эффективности технологических процессов производства проволоки на основе совершенствования деформационных режимов волочения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05. Магнитогорск, 2006. 18 с.
- 19. Усанов М.Ю., Харитонов В.А. Эффективность применения деформации кручения в способах производства наноструктурированной проволоки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. 14. № 4. С. 66—71. 20. Пат. 2498870 RU, МПК В21С 1/00. Способ полу-
- 20. **Пат. 2498870 RU, МПК B21С 1/00.** Способ получения из высокоуглеродистой стали проволоки с наноструктурой / В.А. Харитонов, В.Н. Лебедев, М.В. Чукин, В.А. Бакшинов, Б.А. Коломиец, М.Ю. Усанов. № 2012128910/02; заявл. 06.07.2012; опубл. 20.11.2013.
- 21. **Харитонов В.А., Галлямов Д.Э.** Новый модульно-комбинированный способ производства стальной проволоки // Черные металлы. 2019. № 2 (1046). С. 42—48.

Вениамин Александрович Харитонов, канд. техн. наук, hva-46@vandex.ru;

> Михаил Юрьевич Усанов, канд. техн. наук; Наталия Юрьевна Сметнёва

MATERNAJOBETEHNE N HOBPIE



MATEPNAJIЫ

УДК 621.762.52

К.С. Панина, Ю.А. Курганова (Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана), Ю.В. Николюкин (ООО "НПП "Курс", г. Ульяновск)

Моделирование структуры и расчет компонентного состава материала электродов сильноточной вакуумной и плазменной электроники

Рассмотрен графический метод моделирования структуры композиционного материала электрода. По результатам расчета выбран компонентный состав материала. Предложена модернизация технологии получения заготовки, адаптированная для реализации смоделированной структуры. Получены экспериментальные образцы по традиционной и предложенной технологиям. Сравнительный анализ структуры и свойств образцов позволяет прогнозировать повышение эксплуатационного ресурса электродов и приборов.

Ключевые слова: моделирование структуры; оксидные катоды; электрод; эмиссионный материал; технология оксидных катодов.

Graphical method for modeling of the structure of composite electrode material is considered. The component composition of the material is selected based on the results of the calculation. Upgrading technology for producing of the workpiece, adapted to implement the modeled structure is proposed. Experimental samples using traditional and proposed technologies are obtained. Comparative analysis of the structure and properties of the samples makes it possible to predict increase in the service life of electrodes and instruments.

Keywords: modeling of structure; oxide cathodes; electrode; emission material; oxide cathode technology.

Актуальной тенденцией приборостроения является повышение ресурса работы приборов. В электровакуумных приборах сильноточной вакуумной и плазменной электроники ключевым элементом является электрод, увеличивая стабильность и ресурс работы которого, можно повысить срок работы прибора. Одним из эффективных методов изменения свойств электрода является управление свойствами материала, из которого он изготовлен.

Задача данной работы состоит в моделировании наиболее эффективной структуры катодов, расчете компонентного состава и получении экспериментальных образцов с новым уровнем физико-механических свойств. Результаты исследований могут быть рекомендованы для внедрения в производство.

Функцией электрода является испускание электронов под воздействием приложенного напряжения [1]. В электровакуумных приборах высокой частоты и большой мощности применяют электроды, изготовляемые преимущественно методами порошковой металлургии [2—5]. Традиционно компонентный состав представляет смесь, состоящую из микронных порошков вольфрама W, выступающих в качестве матрицы, порошков никеля Ni — связующего металла и порошков оксида стронция SrO — эмиссионного материала.

Этапы существующей технологии включают в себя смешивание, компактирование и спекание, что не в полной мере позволяет получать равномерную структуру материала, приводит к значительному росту зерна матрицы и образованию пор, в которых свободно

лежит эмиссионный материал, синтезированный в процессе спекания. Такие недостатки приводят к пониженной механической прочности, не позволяют получить требуемые плотность и равномерность структуры, что негативно сказывается на сроке эксплуатации электрода и прибора. Для решения этой проблемы было решено смоделировать структуру материала, рассчитать гранулометрический состав порошков, а также подобрать технологические приемы для получения образцов нового состава.

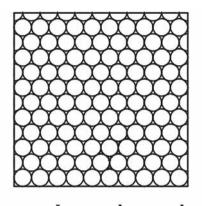
Объект исследований — сплав ВоСт4Н3 следующего состава, % мас.: основа — W; 3...4,5 SrO; 2...3,6 Ni.

По традиционной технологии размер частиц вольфрамовой матрицы после спекания не должен превышать 10 мкм, однако для получения принципиально нового уровня свойств материала предложено ограничить этот контрольный параметр значением 1 мкм, т.е. после спекания в структуре необходимо получить средний размер частиц вольфрама — 1 мкм. Это значение будет опорным при моделировании структуры.

Как показано в работах [6—8], для конструирования рационально использовать трехмерное моделирование, однако для упрощения модели и сокращения временных затрат допустимо применять двумерные модели [9—11]. Такая модель не требует сложного программного обеспечения и удобна для сравнения с полученной структурой экспериментальных образцов в плоскости шлифа. Поэтому для расчета состава компонентов предложена геометрическая модель, приведенная на рис. 1.

Расчет проводили на поле размером 100×100 мм (с масштабом 10 мм = 1 мкм). Частицы условно приняты окружностями. Частицы 1 — вольфрам W с заданным диаметром 1 мкм, 2 — никель Ni и 3 — оксид стронция SrO (см. рис. 1). Эмиссионный материал (SrO) не взаимодействует с составляющими металлами и поэтому должен быть прочно удержан вольфрамовой матрицей. С помощью металла-связки формируется вольфрамовый каркас. Ожидаемая структура: плотноупакованные частицы вольфрама 1, связанные никелем 2, прочно удерживают частицы оксида стронция 3.

При выбранном структурном расположении рассчитано, что размеры частиц SrO должны



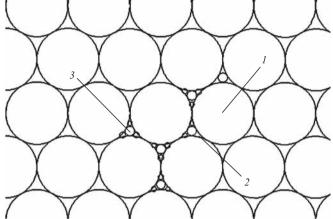


Рис. 1. Модель структуры (поле 100×100 мм): 1 - W; 2 - Ni; 3 - SrO

находиться в диапазоне (100 \pm 5) нм, Ni - (70 \pm 10) нм.

Для определения пропорций компонентов модели рассчитывали относительную долю каждого вещества по формуле

$$\beta = \frac{S}{S_{\text{обш}}},$$

где S — площадь компонента; $S_{\text{общ}}$ — общая площадь компонентов без пустот.

Таким образом, доле площади каждого компонента модели будет соответствовать доля компонентов в исходной смеси экспериментальных образцов. Компонентный состав сплава BoCt4H3, % мас.: 92,6 W; 3,9 SrO; 3,5 Ni.

Соотношение количества порошков никеля и оксида стронция попадает в рассчитанный диапазон значений количества этих порошков в традиционных катодах, поэтому механические и эмиссионные свойства не должны снизиться после модифицирования структуры.

Доля пустот при таком расположении составляет 2,9 %. Это значение дает ориентировочное значение общей пористости после спе-

кания. Теоретическую плотность можно рассчитать по формуле

$$\gamma = \frac{100}{\frac{a_1}{\gamma_1} + \ldots + \frac{a_n}{\gamma_n}},$$

где a_1 , a_n — массовая доля компонентов; γ_1 , γ_n — теоретическая плотность отдельных компонентов заготовки, г/см³;

$$\gamma = \frac{100}{\frac{92,6}{19,25} + \frac{3,9}{4,7} + \frac{3,5}{8,97}} = 16,58 \text{ r/cm}^3.$$

С учетом рассчитанной теоретической пористости 2.9~% плотность материала, полученного по рассчитанному составу, должна составлять $16.09~\text{г/см}^3$.

Для реализации такой структуры и получения принципиально новых свойств предложен переход к нанодиапазону порошков никеля и карбоната стронция с сохранением микронного порошка вольфрама, а также переходу от спекания в среде водорода к спеканию в вакууме при условии предварительной механоактивации смеси.

Положительный эффект применения наночастиц и их влияние на свойства показаны в работах [12—15]. Механоактивация, как перспективный метод получения новых материалов, описана в [16—18]. Увеличение плотности образцов при переходе к спеканию в вакууме приведено в работе [19].

Микроструктуры исходных порошков показаны на рис. 2. Фотографии сделаны в лаборатории тонких физических методов

исследования структуры материалов МГТУ им. Н.Э. Баумана на растровом электронном микроскопе РЭМ VEGAIILMH.

Этапы технологического процесса усовершенствованной технологии представлены в табл. 1.

Механоактивацию предварительно смешанных порошков в заданных пропорциях проводили в механоактиваторе 2SL, формование образцов в виде таблеток — на автоматическом прессе с силой 25 кН и спекание в вакуумной печи по режиму, приведенному на рис. 3.

На экспериментальных образцах исследовали плотность, пористость и твердость.

Общую пористость и плотность измеряли методом гидростатического взвешивания согласно ГОСТ 2409—2014.

Твердость по Виккерсу определяли на твердомере EMCO-TEST по рекомендациям ГОСТ 2999—75.

Сравнительный анализ свойств образцов, полученных по традиционной и усовершенствованной технологиям, представлен в табл. 2.

Анализ свойств образцов, полученных по предлагаемой технологии, показал значительное увеличение твердости и плотности и уменьшение пористости относительно свойств образцов, полученных по традиционной технологии. Значение общей пористости 7 % приближено к теоретическому расчету 2,9 %, однако превышает его ввиду того, что синтез карбоната стронция в оксид сопровождается обильным газовыделением. Наличие пористости снижает значение плотности 15,34 г/см³, но оно также достаточно близко к расчетному 16,09 г/см³.

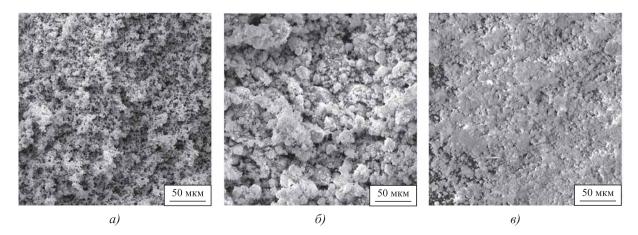


Рис. 2. Микроструктуры исходных порошков (×1000): a - W; $\delta - Ni$; $\epsilon - SrCO_3$

1. Этапы получения электродов

Технологическая	Оборудоромую	Режим		Пругомомую	
операция	Оборудование	T, °C	τ, ч	Примечание	
Подготовка порошков	Водородная печь	800	4	Водородный отжиг для удаления газов	
Навеска	Весы	20	0,5	Процентное содержание компонентов определяется размерами частиц	
Смешивание + добавление пластификатора	Активатор 2SL	20	1	В среде поливинилового спирта	
Сушка	Печь	До 60	_	_	
Просеивание	Вибростенд ПЭ-6700	20	_	Сита 0,1; 0,14; 0,25 мкм	
Формование	Автоматический пресс 25 кН	20	_	2 катода/мин	
Сборка садки	Специальные поддоны	20	0,5	_	
Спекание	Вакуумная печь "Вега-2М"	_	_	Охлаждение с печью до комнатной температуры	
Контроль	Весы	20	2	_	
Механическая обработка	Станок с ЧПУ	20	_	Точение и шлифование	

2. Сравнительный анализ свойств образцов, полученных по различным технологиям

	Tex	Улуч-		
Параметр	тради- ционная	усовершенст- вованная	шение показа- телей, %	
Плотность, г/см ³	12,84	15,34	19	
Общая пористость, %	28	7	25	
Твердость HV	310	422	36	

Структуру образцов исследовали на микроскопе Olimpus GX51F. Микроструктуры образцов приведены на рис. 4.

При анализе микроструктуры экспериментальных образцов наблюдается значительное снижение количества и размера пор, просматривается большая равномерность структуры, размер зерна вольфрама составляет около 1 мкм, как и

было предположено при построении первоначальной геометрической модели.

Таким образом, благодаря моделированию структуры и расчету эффективного компонентного состава материала электрода получены экспериментальные образцы с равномерной структурой и повышенными физико-механическими свойствами.

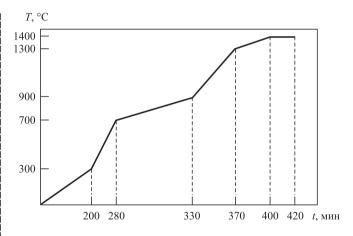


Рис. 3. Режим спекания по традиционной технологии

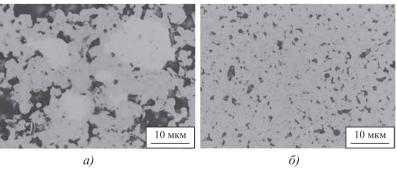


Рис. 4. Микроструктуры образцов, полученных по традиционной (a) и усовершенствованной (б) технологиям. $\times 1000$

Заключение. Представленный подход к конструированию структуры и расчету свойств в заданном направлении результативно зарекомендовал себя в качестве рычага управления фракционным и количественным составом компонентов материала.

Смоделированная структура была успешно реализована за счет инновационных методов: переходу к нанодиапазону порошков никеля и карбоната стронция, введению операции механоактивации и переходу от среды спекания — водород, к спеканию в вакууме. Полученные структура и свойства экспериментальных образцов более приближены к теоретическим.

Анализ свойств образцов, полученных по результатам предварительных расчетов, показал снижение общей пористости на 25 %, повышение плотности и твердости на 19 и 36 % соответственно относительно свойств образцов, полученных по традиционной технологии. Обозначенный уровень свойств приведет к повышению эксплуатационного ресурса электродов и приборов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. **Петров К.С.** Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника. Санкт-Петербург: Питер, 2003. 504 с.
- 2. **Леденцова Н.Е. и др.** Перспективные технологии оксидно-никелевых катодов СВЧ-приборов сантиметрового диапазона длин волн // Тонкие химические технологии. 2016. Т. 11. № 3. С. 74—81.
- 3. **Kuchina I.Y.** et al. Experimental Support of Magnetron Nickel Oxide Cathode Fabrication Process // Izv. Vyss. Uchebnykh Zaved. Mater. Elektron. Tekhniki-Mater. Electron. Eng. 2015. Vol. 18. No. 4. P. 285—290.
- 4. **Мельникова И.П., Лясников В.Н., Лясникова А.В.** Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2012. Т. 15. № 2. С. 84—90.
- 5. **Mishra K.C., Garner R., Schmidt P.C.** Model of work function of tungsten cathodes with barium oxide coating // J. Appl. Phys. 2004. Vol. 95. No. 6. P. 3069—3074.
- 6. **Аникеенко А.В., Медведев Н.Н.** Структурный анализ монодисперсных упаковок твердых сфер при разной плотности // Структура и динамика молекулярных систем. 2007. Т. 1. С. 700—705.
- 7. **Мизгулин В.В. и др.** Моделирование плотных материалов методом упаковки сферополиэдров // Модели в физике и технологии. 2012. Т. 4. №. 4. С. 757—766.
- 8. **Волошин В.П. и др.** Исследование структуры пор в компьютерных моделях плотных и рыхлых

- упаковок сферических частиц // Структурная химия. 1999. Т. 40. № 4. С. 681—691.
- 9. **Колосова Е.В., Демидов С.В.** Компьютерное моделирование макроструктуры композиционного материала // Вестник Череповецкого государственного университета. 2012. Т. 2. № 4. С. 10—13.
- 10. **Псахье С.Г. и др.** Формирование многомасштабной структуры в поверхностных слоях и стойкость металлокерамического сплава в условиях механических воздействий // Физическая мезомеханика. 2011. Т. 6. С. 23—34.
- 11. **Симонов-Емельянов И.Д.** Построение структур в дисперсно-наполненных полимерах и свойства композиционных материалов // Пластические массы. 2015. Т. 9-10. С. 29-36.
- 12. **Silkin A.A. et al.** Formation of the structure of the weld metal upon the introduction of nanoparticles into the weld pool // Russ. Metall. 2016. Vol. 2016. No. 13. P. 1253—1256.
- 13. **Kalashnikov I.E. et al.** Tribological properties of the babbit B83—based composite materials fabricated by powder metallurgy // Russ. Metall. 2016. Vol. 2016. No. 7. P. 669—674.
- 14. **Mostaan H. et al.** Contribution of mechanical activation and annealing in the formation of nanopowders of Al(Cu)/TiC—Al₂O₃ hybrid nanocomposite // Ceram. Int. 2017. Vol. 43. No. 2. P. 2680—2685.
- 15. **Курганова Ю.А., Панина К.С., Бешенков П.С.** Анализ возможности повышения свойств материала ВК15 для бурового инструмента // Записки Горного института. 2018. Т. 233. С. 518—524. DOI: 10.31897/ PMI.2018.5.518.
- 16. **Živojinović J. et al.** The influence of mechanical activation on structural evolution of nanocrystalline SrTiO powders // J. Alloys Compd. 2017. Vol. 695. P. 1—10.
- 17. El Saeed M.A., Deorsola F.A., Rashad R.M. Optimization of the Ti_3SiC_2 MAX phase synthesis // Int. J. Refract. Met. Hard Mater. Elsevier Ltd. 2012. Vol. 35. P. 127—131.
- 18. **Padhan A.M. et al.** Mechanical activation on aluminothermic reduction and magnetic properties of NiO powders // J. Phys. D. Appl. Phys. IOP Publishing. 2017. Vol. 50. No. 21.
- 19. **Поварова К.Б. и др.** Исследование влияния режимов спекания нанопорошков тяжелых сплавов системы W—Ni—Fe—Co на структуру и плотность компактных образцов // Металлы. 2007. Т. 6. С. 65—72.

Кира Сергеевна Панина, kirapaninamgtu@mail.ru; Юлия Анатольевна Курганова, д-р техн. наук; Юрий Валерьевич Николюкин

RNUAM90ФНИ

УДК 621.79.01

А.Ф. Третьяков

(Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана)

Применение металлических пористых материалов для изготовления изделий с заданными свойствами

Металлические пористые материалы отличаются значительным разнообразием типов структурообразующих элементов и технологических процессов их изготовления. Разработаны технологии изготовления штампосварных изделий из пористых сетчатых материалов с заданными свойствами на основе явления технологической наследственности. Носителями наследственной информации являются свойства, форма и размеры структурообразующих элементов; параметры, описывающие их взаимное расположение, относительное обжатие в процессе горячей деформации и качества их консолидации. Пористые сетчатые материалы, изготовляемые сваркой давлением проволок тканых сеток, представляют значительный интерес при создании штампосварных проницаемых изделий с заданными свойствами.

Ключевые слова: металлические пористые материалы; пористый сетчатый материал; технологическая наследственность; свариваемость.

Metallic porous materials have wide variety of structure-forming elements and technical processes of their manufacturing. Process to produce stamp-welded parts from porous net materials with specific properties on the technological heredity phenomenon basis are elaborated. Hereditary information carriers are properties, shape and sizes of structure-forming elements; parameters describing their mutual bracing, percent reduction at hot deformation and consolidation quality. Porous net materials produced by pressure welding of wire cloth are of great interest at producing of stamp-welded permeable parts with specific properties.

Keywords: metallic porous materials; porous net material; technological heredity; weldability.

Развитие современного машиностроения требует создания новых энергетических установок и устройств с повышенными коэффициентами полезного действия, обладающих высокой надежностью функционирования. Переход на более напряженные рабочие параметры эксплуатации агрегатов сделал необходимым решения целого ряда проблем, одной из которых является создание технологических процессов изготовления конструкций, обеспечивающих защиту от высоких температур, окислительных сред, попадания механических частиц, а также их рациональное охлаждение.

Увеличение температур и скоростей энергоносителей привело к повышению тепловых потоков к стенкам, наиболее эффективным способом охлаждения которых является подача газа в пограничный слой через пористую оболочку [1—3]. Применение устройств с про-

ницаемыми элементами обеспечивает также возможность надежного поддержания на поверхности стенки необходимой температуры, уменьшения сил трения, снижения или устранения их механической эрозии.

Стремление увеличить надежность современных пневмо- и гидросистем приводит к повышению требований по чистоте используемых в них жидкостей и газов. В процессе создания конструкции фильтров важным этапом является обоснованный выбор проницаемых элементов [4—6], которые должны обеспечивать необходимую тонкость очистки, обладать высокой проницаемостью и необходимыми механическими свойствами во всем диапазоне рабочих температур и нагрузок. При этом в очищаемые среды не должны попадать частицы, вымываемые из проницаемого материала в процессе эксплуатации. Фильтры

должны отвечать требованиям коррозионной стойкости. При этом пористые заготовки, используемые для изготовления проницаемых элементов различной конфигурации, должны обладать необходимыми технологическими свойствами [7].

Пористые материалы (ПМ), используемые в различных областях науки и техники, отличаются от компактных меньшей плотностью и проницаемостью. Их можно разделить на две большие группы: ПМ на неметаллической и на металлической основах. Последние широко применяют в машиностроении, теплоэнергетике, ракетной, авиационной, химической и других отраслях промышленности. Это объясняется тем, что ПМ на металлической основе имеют требуемые прочностные, теплофизические, гидравлические, технологические свойства и способны работать при высоких температурах и давлениях.

К ПМ на металлической основе можно отнести пористые порошковые материалы (ППМ), пористые волокновые материалы (ПВМ), пористые сетчатые материалы (ПСМ), комбинированные пористые проницаемые материалы и др. [4].

При создании современной техники все большее значение приобретает проблема оптимального проектирования деталей и машин. Число исследований в этой области непрерывно растет, но чаще при проектировании варьируют геометрическими параметрами изделий и не рассматривают технологию изготовления заготовок, из которых они создаются. Исторический опыт производства и применения традиционных металлов и сплавов привел к дифференциации процессов изготовления заготовок и конструкций из них. Поэтому разработка технологий ведется на основе имеющихся заготовок, обладающих определенными характеристиками.

С появлением конструируемых (композиционных) материалов многими исследователями неоднократно отмечено, что заготовки нельзя рассматривать отдельно от изделий, для изготовления которых они используются. Это означает, что утверждение об оптимальности технологии приобретает смысл только при конкретизации условий эксплуатации, геометрических параметров изделий и технологии их изготовления.

Таким образом, создание штампосварных изделий из ПМ с оптимальным свойствами

возможно только на основе системного подхода, учитывающего технологические процессы изготовления листовых пористых заготовок, штамповки, сборки и сварки элементов конструкции.

Возможны различные пути достижения поставленной цели, один из которых основан на явлении технологической наследственности [8], который предполагает рассмотрение всей совокупности технологических операций получения изделий, установление связей и взаимозависимостей свойств изготовляемых деталей на предыдущих и последующих операциях.

Явление технологической наследственности наблюдается в любом технологическом процессе, однако ее проявление особенно важно при изготовлении изделий из пористых материалов. Исследования показали, что пористые заготовки обладают сложной совокупностью структурных, гидравлических, теплофизических и механических свойств, значения которых существенно изменяются в процессе последующих операций листовой штамповки и сварки. Наследственная часть погрешности, которая возникает на этапе получения листовых пористых материалов, оказывается значительной и занимает большую часть допуска на параметр изделия. Утверждение о том, что качество изделий из ПМ может быть получено только на одном из этапов изготовления проницаемых изделий с заданными свойствами, является неправильным и практически никогда не подтверждается.

Исходными носителями наследственной информации являются свойства, форма и размеры структурообразующих элементов; параметры, описывающие их взаимное расположение и качество консолидации. Все операции, связанные с пластическим деформированием и соединением структурообразующих элементов, приводят к изменению их первоначального расположения, формы, размеров, химического состава поверхностных слоев в результате комплексного воздействия температуры, величины и скорости деформации, а также газовой среды. Анализ влияния всей совокупности параметров технологического процесса изготовления ПМ позволил установить, что наиболее значимое влияние на изменение исходной структуры оказывает относительное обжатие структурообразующих

При этом с увеличением значения этого параметра возрастают прочность и теплопроводность, уменьшаются пористость, проницаемость и размер пор.

Таким образом, в результате сложных взаимосвязей между многочисленными свойствами изделий из ПМ и параметрами их изготовления технологический процесс представляет собой сложный объект управления, для адекватного описания которого важен разумный уровень детализации. Проектирование единого процесса изготовления проницаемых изделий позволяет выделить этап создания листовой заготовки в качестве самостоятельной функциональной подсистемы управления со своей внутренней организацией.

Выбор оптимального варианта технологии изготовления изделия с заданными свойствами осуществляется на основе анализа, основной процедурой которого является математическое моделирование. Основной принцип моделирования пористых систем состоит в том, что сложный реальный объект заменяется более простой геометрической моделью, доступной для элементарного математического описания. При таком упрощении игнорируются многие особенности реального строения ПМ. При этом модель содержит только главные определяющие черты пористого тела. Развитие работ по моделированию проницаемых изделий в последнее время характеризуется обращением к фактическим данным об их реальном строении. Модель только приблизительно соответствует объекту, причем степень этого соответствия отличается для различных свойств реального объекта исследования.

Пористые тела представляют собой двухфазную систему, которая кроме твердой содержит газообразную или жидкую фазы и поверхность раздела между ними. При этом пространство, занимаемое газообразной или жидкой фазами, называется порами. В понятие "геометрия пористой структуры" входят: объем пор, линейные размеры поверхности раздела фаз и форма структурообразующих элементов.

Развивая правило обращения пористых структур, можно показать, что неважно геометрию какой из фаз изучать, т.е. если исследована геометрия пор, то нет необходимости изучать геометрию твердого тела и наоборот. Правило обращения может быть эффектив-

но использовано при моделировании, так как в процессе изучения пористой структуры твердых тел можно представить ее элементами пор и структурообразующими элементами. Многочисленными исследованиями установлено, что практически всегда пористое тело проще моделировать в какой-либо одной системе: в системе пор или в системе твердого тела.

Рациональное применение ПМ возможно при условии проектирования технологических процессов получения изделий от формулировки технического задания до определения параметров изготовления изделий и выбора средств технологического оснащения для реализации проекта.

Системный подход к реализации проектирования изделий из ПМ включает: определение марок материалов и конструкций структурообразующих элементов; установление механизмов их уплотнения и консолидации; создание математической модели, описывающей влияние параметров технологического процесса на свойства, а также оптимизацию значений управляющих параметров.

Практическое применение методики проектирования процессов изготовления оптимальных изделий из ПМ рассмотрено на примере создания конструкций из пористых сетчатых материалов (ПСМ). Математическая модель, описывающая влияние управляющих параметров на свойства проектируемых изделий, разработана на основе адекватных детерминированных и статистических моделей с использованием теории пластичности и регрессионного анализа.

Первый этап проектирования направлен на разработку технических требований на изделие, установление основных ограничений на форму и размеры конструкции. Завершением этого этапа является формулировка технических требований на пористый материал с указанием необходимых значений эксплуатационных, механических свойств и технологических ограничений, а также установление максимального относительного радиуса гибки, предельных значений коэффициентов вытяжки, отбортовки, минимальной относительной прочности сварных соединений и т.п.

На втором этапе с учетом сформулированных технических требований последовательно определяют возможность применения выпускаемых промышленностью пористых

материалов: металлических сеток, пористых порошковых материалов (ППМ), пористых волокновых материалов (ПВМ) и др. Если рассматриваемые заготовки не удовлетворяют предъявленным требованиям, то исследуют возможность использования более дорогостоящих ПСМ.

С этой целью определяют диапазоны возможного варьирования управляющих параметров и вычисляют предельные значения требуемых свойств материала. На этом этапе проводят дополнительные исследования для определения недостающих функциональных зависимостей. При установлении принципиальной возможности применения ПСМ для изготовления конструкций с заданными свойствами выбирают маршрутную технологию изготовления листового пористого материала. Затем с использованием априорной информации определяют марку материала проволок сеток, методы уплотнения брикета сеток и консолидации проволок при получении ПСМ.

Третий этап проектирования предусматривает определение оптимальных значений конструктивных и технологических параметров, обеспечивающих получение ПСМ с заданными свойствами. Для этого в установленных диапазонах изменения управляющих параметров вычисляют значения соответствующих свойств материала и проверяют выполнение условия работоспособности. В случае когда не удается получить решения, удовлетворяющего техническим требованиям, корректируют маршрутную технологию. Если этого недостаточно, то уточняют технические требования к пористому материалу.

При наличии нескольких вариантов технологических решений, обеспечивающих изготовление ПСМ с заданным комплексом свойств, оптимальные значения параметров определяют по максимальному значению целевой функции, в качестве которой принимают межслойную прочность проектируемого материала. Затем по результатам вычислений выбирают технологическое оборудование и оснастку. Если существующие средства технологического оснащения не удовлетворяют предъявленным требованиям, то необходимо создание специализированного оборудования и оснастки.

Следующими функциональными звеньями единого процесса оптимального проекти-

рования изделия являются формоизменение листовой заготовки и сварка элементов конструкции. На этих этапах проектирования, как и при создании листового ПСМ, устанавливают маршрутную технологию, вычисляют значения параметров листовой штамповки и сварки путем анализа соответствующих математических моделей и проверки выполнения условия работоспособности. В случае когда не удается получить приемлемое решение, изменяют схемы деформирования, вид сварки элементов конструкции или корректируют чертеж конструкции (изделия).

Оптимальные значения параметров листовой штамповки и режима сварки, окончательно формирующие свойства и геометрические параметры изделий, выбор оборудования, проектирование инструмента, выпуск чертежей и технической документации являются необходимыми этапами проектирования технологического процесса. Основным критерием оптимальности является соответствие свойств и размеров изготовленного изделия техническому заданию. Если погрешности превышают допустимые значения, то могут быть уточнены или пересмотрены все этапы проектирования.

Проведенный анализ конструкций агрегатов и условий их работы позволил установить, что наиболее перспективными являются пористые материалы на металлической основе, которые обладают требуемой проницаемостью, размером пор, высокими механическими и технологическими свойствами.

Применение в качестве заготовок фильтрующих элементов нашли тканые сетки из коррозионно-стойких сталей. Тонкость очистки жидкостей и газов одним слоем сетки достигает 20...40 мкм [4]. Некоторое улучшение фильтровальных характеристик может быть достигнуто в результате применения многослойных брикетов сеток.

Исследования штампуемости и свариваемости тканых сеток показали их низкие технологические свойства вследствие значительной анизотропии и перемещения проволок друготносительно друга при пластической деформации. К недостаткам сеток следует также отнести возможность увеличения проходных сечений ячеек при листовой штамповке, сварке плавлением и эксплуатации изделий.

Создание проницаемых материалов на основе металлических волокон (ПВМ) вызвало

большой интерес, прежде всего, благодаря возможности достижения высокой пористости, которая может достигать 0,98. Исследования влияния параметров компактирования на структуру и свойства ПВМ [9—11] показали, что эти материалы обладают высокими гидравлическими и механическими свойствами.

Приведенные свидетельствуют данные целесообразности использования заготовок из ПВМ для изготовления капиллярных структур тепловых труб и заборных устройств, обеспечивающих подачу жидкостей против сил гравитации или в условиях невесомости, а также проницаемых элементов с тонкостью очистки 2...10 мкм. Эти материалы с пористостью 0,76...0,80 имеют в 2—6 раз более высокую демпфирующую способность, чем алюминий при равном с ним отношением массы к плошали. Благодаря высоким антивибрационным и звукопоглощающим свойствам волокновые материалы нашли применение при изготовлении элементов конструкций, используемых при эксплуатации точных приборов, электронной аппаратуры, станков и турбин. Однако отсутствие данных о штампуемости и свариваемости волокновых материалов не позволяет в настоящее время рекомендовать их для изготовления штампосварных изделий с заданными свойствами.

Экспериментальные исследования гидравлических, фильтровальных, механических и технологических свойств порошковых пористых материалов (ППМ) из коррозионностойких сталей показали, что основным преимуществом этого вида проницаемых заготовок является возможность при фильтрации жидкостей и газов задерживать механические частицы размером до 2 мкм [4, 12]. Существенным фактором, ограничивающим применение ППМ для изготовления проницаемых изделий, является низкая штампуемость, так как относительное удлинение этих материалов при разрыве не превышает 1,5 %.

Возможность изготовления проницаемых изделий больших размеров и сложной формы из ПМ неразрывно связаны с проблемой получения сварных конструкций путем соединения пористых элементов. При этом сварные соединения должны обладать минимальной шириной шва, максимальной относительной прочностью при отсутствии в шве или в зоне термического влияния трещин и других сквоз-

ных дефектов. Результаты исследования свариваемости ППМ в условиях аргонодуговой сварки показали, что при пористости основного материала 0,4...0,5 из-за наличия в них закрытых пор основным дефектом являются сквозные "свищи" в шве, которые образуются при выбросе металла в процессе расплавления. При этом относительная прочность стыковых соединений не превышает 0,7...0,9. Применение аргонодуговой сварки ограничено, поскольку образуются широкие швы, существенно уменьшающие поверхность фильтрации.

Проведенные эксперименты по электроннолучевой сварке заготовок из ППМ на стандартном оборудовании показали возможность получения равнопрочных соединений. Однако в результате неравномерной структуры, характерной для высокопористых ППМ, в стыковых сварных соединениях на участках с большим размером пор возникают прожоги. Для получения качественных швов в процессе изготовления изделий из ППМ марки ПХ18Н15 в работе [13] предложено использовать остающиеся подкладки из компактной стали 12Х18Н10Т, температура плавления которой ниже, чем у пористых заготовок.

Пористые сетчатые материалы (ПСМ), изготовляемые сваркой давлением тканых проволочных сеток с применением горячей деформации в контролируемой газовой среде, представляют значительный интерес для проницаемых изделий с требуемыми характеристиками [14]. Благодаря организованной структуре и сварке проволок сеток между собой они обладают стабильными и воспроизводимыми свойствами. ПСМ применяют при изготовлении фильтрующих элементов [4, 5] для очистки жидкостей и газов от механических примесей, а также в системах теплозащиты ракетных двигателей [15]. Также их применяют для создания оболочек турбинных лопаток парогазовых установок и газотурбинных двигателей [1, 2, 16], капиллярных заборных установок [17] и др.

Экспериментальные исследования штампуемости и свариваемости ПСМ из стали 12X18H10T показали, что более технологичными являются заготовки с высокой межслойной прочностью и низкой анизотропией механических свойств в плоскости листа [18]. При этом установлено, что формоизменение лимитируется не только опасностью разрушения

в плоскости листа, но и возможностью расслоения заготовки в процессе листовой штамповки.

Отличием ПСМ от порошковых пористых материалов является явно выраженная анизотропия свойств. Существенное влияние на формирование шва в условиях сварки плавлением оказывает соотношение коэффициентов эффективной теплопроводности кромок по толщине (λ_{\perp}) и в направлении, перпендикулярном движению источника сварки (λ_{W}). При сварке высокопористых заготовок с низкой теплопроводностью по толщине в зависимости от величины λ_{W} возможно образование дефектов различного вида.

Для заготовок с высоким значением λ_W в результате интенсивного теплоотвода в плоскости листа уменьшается глубина проплавления и возрастает градиент температуры по ширине сварочной ванны, что может привести к разрыву шва в процессе кристаллизации. А при сварке тех же заготовок в направлении, для которого характерно низкое значение λ_W , происходит несплавление отдельных проволок в кромках соединяемых элементов с металлом шва. Такие дефекты возникают в результате действия сил поверхностного натяжения на границе жидкого металла оплавившихся проволок и сварочной ванны.

В результате экспериментов определено, что для заготовок с высокой анизотропией теплопроводности в плоскости листа ширина непроницаемой зоны (шва) не зависит от направления сварки, а возрастает с уменьшением теплопроводности в направлении толщины свариваемых кромок.

Изучение свариваемости ПСМ из стали 12X18H10T показало, что с уменьшением пористости и увеличением соотношения $\lambda_{\perp}/\lambda_{W}$ качество сварных соединений повышается. Для изготовления высокопористых сварных конструкций целесообразно применять ПСМ с меньшей анизотропией теплопроводности в плоскости листа. Для этого используют ПСМ на основе сеток с квадратными ячейками (ГОСТ 3826-82 и ТУ 14-4-507-99), расположенных под углом 45° .

Эксперименты по аргонодуговой сварке пористых заготовок из стали 12X18H10T позволили установить, что качественные сварные соединения могут быть получены на минимально возможном токе, при котором происходит проплавление корня шва. Автоматическая

сварка стыковых соединений со скоростью $v_{cb} > 30$ м/ч требует осуществления процесса при более высокой силе тока, что для заготовок с пористостью более 30 % приводит к образованию подрезов в зоне сплавления, а при $v_{cb} < 10$ м/ч резко возрастает ширина шва. Поэтому оптимальная скорость сварки должна быть в интервале от 10 до 30 м/ч, причем с увеличением пористости заготовок скорость снижается. Для уменьшения вероятности образования подрезов в зоне сплавления сварку изделий с пористостью более 0,2 целесообразно осуществлять с присадочным материалом.

Исследования механических свойств стыковых сварных соединений в условиях одноосного и двухосного растяжения показали, что с увеличением пористости основного материала происходит снижение относительной прочности, величина которой при пористости более 0,2 может быть описана следующей эмпирической зависимостью:

$$\sigma_{cB}/\sigma_{B_{X,Y}}=1,3-1,5\Pi,$$

где $\sigma_{\text{св}}$ — прочность стыкового сварного соединения с той же пористостью в направлении проволок сеток; $\sigma_{\text{В}_{X,Y}}$ — предел прочности ПСМ при одноосном растяжении в направлении проволок сеток; Π — пористость заготовок в относительных единицах.

Электронно-лучевая сварка является оптимальным видом сварки пористых заготовок при создании фильтрующих элементов тонкой очистки жидкостей и газов от механических загрязнений. Для разработки технологии сварки и изучения прочности сварных соединений проведены исследования, в которых варьировали силой тока луча, скоростью сварки и пористостью заготовок. Интервалы варьирования параметрами приведены в таблице, а в качестве параметра оптимизации приняли относительную прочность сварных соединений $\sigma_{\rm cs}/\sigma_{\rm B_{\chi,\gamma}}$.

Основные уровни и интервалы варьирования

		Ин-		
Параметр	нижний —1	нулевой 0	верхний +1	тервал варьи- рования
Ток луча, мА	45	55	65	10
Скорость сварки, м/ч	20	35	50	15
Пористость	0,15	0,25	0,35	0,1

В процессе сварки диаметр фокального пятна, фокусное расстояние и ускоряющее напряжение не изменяли и поддерживали соответственно равными $d_{\Pi}=0.5\,$ мм, $l_0=120\,$ мм и $V_{\rm H}=30\,$ кВ. Величина $\sigma_{{\rm B}_{X,Y}}$ составляла для ПСМ с пористостью 0,35 и 0,15 соответственно 190 и 300 МПа. В качестве расчетной модели приняли полином первой степени, расчет коэффициентов которого позволил получить следующее уравнение регрессии:

$$\sigma_{c_B}/\sigma_{B_{X,Y}} =$$
= 0,804 + 0,075\Pi - 0,023\Pi v_{c_B} + 0,0057v_{c_B}. (1)

Анализ уравнения (1) показал, что при пористости основного материала менее 0,25 увеличение относительной прочности может быть достигнуто путем повышения скорости сварки, а при пористости более 0,25 уменьшение скорости сварки приводит к увеличению $\sigma_{\text{св}}/\sigma_{\text{В}_{X,Y}}$. При этом изменение тока луча в интервале 0,45...0,65 мА незначительно влияет на прочность соединения.

Металлографические исследования выявили наличие подрезов в местах несплавления проволок с металлом шва, количество которых возрастало с увеличением пористости. Ширина получаемых швов на образцах толщиной 2,8...3,8 мм при варьировании параметров режима сварки изменялась несущественно и составляла 2,5...3,0 мм.

Исследование влияния термического цикла сварки на изменение гидравлических и структурных характеристик пористых заготовок показало, что снижение проницаемости сварных соединений пропорционально площади шва, при этом размеры пор в зоне сплавления не изменяются.

Результаты выполненных исследований использованы при проектировании и изготовлении фильтроэлементов с заданной тонкостью очистки и проницаемостью, а также штампосварных втулок теплообменников-испарителей и тепловых труб.

Заключение. Создание штампосварных изделий с заданными свойствами целесообразно на основе системного подхода, учитывающего технологические процессы изготовления листовых пористых заготовок, штамповки и сварки элементов штампосварных конструкций. Исследования гидравлических, фильтровальных и механических свойств, штампуемости и свариваемости ПМ показали, что ПСМ

из стали 12X18H10T обладают оптимальным комплексом свойств. Благодаря организованной структуре и сварке проволок сеток между собой они обладают стабильными и воспроизводимыми свойствами.

Экспериментальные исследования свариваемости ПСМ позволили установить, что технологические свойства повышаются с увеличением межслойной прочности и снижением анизотропии свойств в плоскости листа. Формоизменение лимитируется не только опасностью разрушения заготовки в плоскости листа, но и возможностью ее расслоения в процессе листовой штамповки. Изучение влияния термического цикла сварки плавлением (аргонодуговая сварка и электронно-лучевая сварка) на изменение гидравлических и структурных характеристик пористых заготовок показало, что снижение проницаемости сварных соединений пропорционально площади шва, при этом размеры пор в зоне сплавления не изменяются.

Разработаны технологические процессы изготовления штампосварных изделий с заданными свойствами, которые реализованы на ряде предприятий при получении ПСМ и создании на их основе фильтров для очистки жидкостей и газов от механических частиц, пористых втулок теплообменников-испарителей и тепловых труб, отвечающих требованиям эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. **Испытания** пористых сетчатых материалов в качестве оболочек турбинных лопаток, высокотемпературных газовых турбин / Ю.А. Зейгарник, А.Ф. Поляков, В.К. Стратьев, А.Ф. Третьяков, Ю.Л. Шехтер // Препринт. ОИВТ РАН. 2010. № 2-502. 64 с.
- 2. **Bunker R.S.** Gas turbine cooling. Moving from macro to micro cooling. Proceeding of the ASME TURBO EXPO, 2013. 3 p.
- 3. **Pelevin F.V.** Heat transfer in meshed metallic materials with interchanel transpiration and two-dimensional intermesh flow of heat transfer fluid // High Temperature. 2018. 46 (2). P. 208–216.
- 4. **Пористые** проницаемые материалы / под ред. С.В. Белова. М.: Металлургия, 1987. 335 с.
- 5. **Sparks T., Chase G.** Filters and Filtration. Handbook. Elsevier, 2013. 444 p.
- 6. Спиридонов В.С., Новиков Ю.М., Большаков В.А. Фильтровальные перегородки из спеченных металлических сеток для встроенных фильтров авиационных гидросистем // Безопасность в техносфере. 2015. № 4. С. 39—45.
- 7. **Kolesnikov A.G., Safonov A.N.** Modern developments of new materials and technological processes for engineering // Tyazheloe Mashinostroenie. 1998. No. 2. P. 17—21.

- 8. **Технологическая** наследственность в машиностроительном производстве / А.М. Дальский, Б.Н. Базаров, А.С. Васильев, А.Г. Колесников. М.: МАИ, 2000. 354 с.
- 9. **Kostornov A.G.** Capillary transport of low—viscous liquids in porous metallic materials under action of gravitation force // Poroshkovaya Metallurgiya. 2003. No. 9—10. P. 13—26.
- 10. **Kostornov A.G., Krichenko O.V., Brodnikovskii N.P. et al.** High-porous material made from alloy steel fibers: production, structure, and mechanical properties // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2008. 47 (5—6). P. 295—298.
- 11. **Kostornov A.G., Shapoval A.A., Lalor M.J. et al.** A study of heat transfer in heat pipe evaporators with metal fiber capillary structures // Journal of Enhanced Heat Transfer. 2012. 19 (1). P. 43—51.
- 12. **Belov S.V., Shmelev L.S., Spiridonov V.S. et al.** Structural hydraulic, and filter characteristics of type FNS porous sheets // Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 1986. 25 (3). P. 256—241.
- 13. **Special** features of welding filtration of the cartridge type produced from porous metallic materials / V.V. Ovchin-

- nikov, A.A. Antonov, M.A. Gureev, V.S. Magnitov // Welding International, 2002. No. 10, P. 828—831.
- 14. **Пористые** сетчатые материалы / Ю.И. Синельников, А.Ф. Третьяков, Н.И. Матурин, А.Г. Колесников, А.Д. Панов, В.И. Макарочкин. М.: Металлургия, 1983. 64 с.
- 15. Xu G., Liu Y., Luo X. et al. Experimental investigation of transpiration cooling for sintered woven wire mesh structures // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. Vol. 91. P. 898—907.
- 16. **Новиков Ю.М., Большаков В.А.** Инженерная школа МГТУ им. Н.Э. Баумана: комбинированные пористые сетчатые материалы. Эффективные, безопасные и экологичные изделия на их основе // Безопасность жизнедеятельности. 2005. № 11. С. 53—56.
- 17. **Третьяков А.Ф.** Влияние конструктивных и технологических параметров на анизотропию механических свойств пористых материалов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. № 12. С. 87—96.

Анатолий Фёдорович Третьяков, д-р техн. наук, tretyakov@bmstu.ru







ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»



СПРАВОЧНИК технолога-машиностроителя

в 2-х томах

Под ред. А.С. Васильева, А.А. Кутина

Издание 6-е, переработанное и дополненное 2018 г. 1574 с.

В справочнике использованы стандарты, действующие на 1 января 2018 г.

Цена 15 000 руб.

- **Том 1.** Приведены сведения по управлению качеством и точности изготовления деталей машин, рекомендации по выбору заготовок, припуски на механическую обработку, сведения по разработке различных технологических процессов изготовления деталей, по обработке деталей на станках с ЧПУ и агрегатных станках, даны рекомендации по оформлению технической документации.
- **Том 2.** Приведены сведения о металлорежущих станках и инструментах, станочных приспособлениях, режимах резания, методах и средствах измерения, обработке поверхностей пластическим деформированием, электрофизикохимическим методам обработки и технологии сборки. Также дан технико-экономический расчет вариантов технологических процессов.

Шестое издание (5-е изд. 2003 г. под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова и др.) переработано и дополнено в соответствии с новыми достижениями технологической науки и практики и действующими стандартами.

Для инженерно-технических работников всех отраслей машиностроения, может быть полезен преподавателям, аспирантам и студентам вузов.

ПРИОБРЕСТИ КНИГУ ПО ЦЕНЕ ИЗДАТЕЛЯ МОЖНО, ПРИСЛАВ ЗАЯВКУ

по e-mail: realiz@mashin.ru

Дополнительная информация по телефону (495) 785-60-69 и на сайте WWW.MASHIN.RU



Weldex—2019

19-я Международная выставка сварочных материалов, оборудования и технологий

15—18 октября 2019 г., Москва

Место проведения: Конгрессно-выставочный центр "Сокольники"

Тематики выставки:

- Оборудование и материалы для сварки
- Оборудование для резки металла
- Промышленные роботы
- Оборудование и материалы для нанесения защитных и упрочняющих покрытий
- Оборудование для контроля качества сварных соединений
- Инструменты и приспособления для сварочных работ
- Средства индивидуальной и коллективной защиты при проведении сварочных работ
- Оборудование для обработки кромок
- Технические газы
- Оборудование для приварки крепежа
- Оборудование для сварки полимерных материалов

По данным www.weldex.ru

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2 Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение". E-mail: zpm@mashin.ru

Тел. редакции журнала: (499) 268-47-19, 269-54-96. http://www.mashin.ru

Технический редактор Патрушева Е.М. Корректор Сажина Л.И.

Сдано в набор 08.07.2019. Подписано в печать 22.08.2019. Формат 60 × 88 1/8.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.

Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз".

119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.





70 лет

Виктору Алексеевичу Дёмину,

доктору технических наук, профессору

Виктор Алексеевич Дёмин родился 4 сентября 1949 г. в Москве.

В 1966 г. после окончания школы Виктор Алексеевич поступил в Завод-втуз при автозаводе им. И.А. Лихачева (сейчас Московский политехнический университет) по специальности "Машины и технологии обработки металлов давлением". Одновременно работал на ЗИЛе контролером отдела технического контроля, а затем старшим техником-технологом в цехе холодной штамповки.

В 1972 г. после окончания института был распределен на работу в Завод-втуз в должности ассистента.

С 1975 г. обучался в целевой аспирантуре МГТУ им. Н.Э. Баумана, где в 1979 г. защитил кандидатскую диссертацию. В 1981 г. Виктору Алексеевичу присвоено ученое звание доцента, а в 2003 г. после защиты докторской диссертации — звание профессора.

В Московском государственном индустриальном университете В.А. Дёмин проработал с 1972 по 2011 г., где занимал должности ассистента, доцента, профессора, заведующего кафедрой, декана Вечернего и Общенаучного факультетов, проректора, ректора. В настоящее время Виктор Алексеевич работает в должности профессора кафедры "Технологии обработки давлением" МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В своей работе особое внимание уделяет пропаганде, развитию и внедрению в учебный процесс дистанционных технологий обучения инженеров. В рамках Федеральной целевой программы развития образования В.А. Дёмин является одним из создателей Межвузовского ресурсного центра коллективного пользования "Технологии 21 века". Это позволило в режиме удаленного доступа объединить ресурсы ряда вузов и промышленных предприятий в подготовке инженерных кадров.

Виктор Алексеевич проводит большую работу по пропаганде последних достижений науки и техники, являясь действительным членом Российской академии транспорта, Международной академии менеджмента. Является заместителем председателя редакционного совета журнала "Заготовительные производства в машиностроении" и членом редакционного совета журнала "Наукоемкие технологии в машиностроении".

В.А. Дёмин — известный специалист в области теории обработки металлов давлением, автор разработки новых технологических процессов высокоскоростной и толстолистовой штамповки. Им опубликовано более 150 научных и учебно-методических работ, в том числе 12 монографий, 19 учебных пособий, получено 15 авторских свидетельств. Его монография "Проектирование процессов толстолистовой штамповки на основе прогнозирования технологических отказов" широко используется в учебном процессе и научных разработках в Московском политехническом университете, Тульском государственном университете и других российских вузах.

Виктор Алексеевич награжден орденом Дружбы (2000 г.), медалями "За трудовое отличие" (1996 г.), "В память 850-летия Москвы" (2000 г.), ему присвоено звание "Почетный работник высшего профессионального образования", в 2011 г. — почетное звание "Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации" и присуждена премия Правительства Российской Федерации в области образования (за научнопрактическую разработку "Научно-учебно-педагогический комплекс по подготовке кадров высшей квалификации в области инновационных и высоких технологий обработки металлов давлением".

Коллектив редакции и редакционный совет журнала поздравляют Виктора Алексеевича с юбилеем! Желаем крепкого здоровья, благополучия, новых профессиональных успехов и достижений!