ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(Кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства)

№ 10 октябрь 2007

Председатель редакционного совета и Главный редактор
СЕМЁНОВ Е.И.

Зам. председателя редакционного совета:
ДЁМИН В.А.
КОЛЕСНИКОВ А.Г.

Зам. Главного редактора
КЛЕЙЗЕР П.Е.

Редакционный совет:
БЕЛЯКОВ А.И.
БЛАНТЕР М.С.
БОГАТОВ А.А.
БОКОВ А.А.
ГРОМОВ В.Е.
ГУН И.Г.
ЖЕСТКОВА И.Н.
ЗАРУБИН А.М.
КАПУСТИН А.И.
КАСАТКИН Н.И.
КОШЕЛЕВ О.С.
КРУК А.Т.
МОРОЗ Б.С.
МУРАТОВ В.С.
НАЗАРЯН Э.А.
ОВЧИННИКОВ В.В.
ПАСЕЧНИК Н.В.
ПОВАРОВА К.Б.
ПОЛЕТАЕВ В.А.
СЕМЁНОВ Б.И.
СУБИЧ В.Н.
ТРЕГУБОВ Г.П.
ТРУХОВ А.П.
ШАТУЛЬСКИЙ А.А.
ШЕРКУНОВ В.Г.
ЯКОВЛЕВ С.С.
ЯМПОЛЬСКИЙ В.М.

Ответственные за подготовку и выпуск номера:
ДЮБКОВА Н.В.
БЕЛАВЕНЦЕВ Р.Ю.
СЕРИКОВА Е.А.

Журнал зарегистрирован в Государственном Комитете Российской Федерации по печати.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-12218 от 29.03.02

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

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

Тел.: (495) 268-47-19, 268-69-19
Факс: (495) 269-48-97
Http://www.mashin.ru
E-mail: zpm@mashin.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Литейное и сварочное производства

Маццарелли Джованни, Маццарелли Джузеппе, Беляков А.И., Сайфаев А.Г., Беляков А.А. Литейное производство ООО "Металлитмаш" 3
Семёнов В.И. Ключевые факторы адаптации дендритной структуры отливок к однонаправленному теплоотводу 7
Карабанов В.В. Некапиллярная пайка – новый этап развития теории и практики паяльного производства 14
Создание дробеметного оборудования на ООО "Завод "Амурлитмаш" 20

Кузнечно-штамповочное производство

Дёмин В.А., Шестаков Н.А., Субич В.Н. Осадка заготовок в оболочках 22
Мамаев В.Б. Влияние формы осесимметричных штампуемых заготовок на материало- и энергозатраты при штамповке в открытых штампах 26
Леванов А.Н. Общие закономерности и полезные эффекты контактного трения в процессах обработки металлов давлением 31

Прокатно-волочильное производство

Арсентьева Н.С., Железняк Л.М., Боков Н.Ф., Дашкевич О.Н., Кузьмина Е.В., Глухова О.Л. Изготовление нестандартных полос из электротехнической меди в ОАО "Каменск-Уральский завод по обработке цветных металлов". 36
Семёнов И.Е., Рыженко С.Н., Поворов С.В. Динамическое моделирование процесса локальной гибки-формовки для технологий производства покрытий для крыш 40

Материаловедение и новые материалы

Филиппов А.А., Пачурин Г.В. Температура изотермической закалки калиброванного проката из стали 40Х под холодную высадку 44
Фокин Б.В. Фрактография и прочность керамики на основе нитрида кремния . . 46

Информация

Чертов В.М. Получение точных заготовок из тонколистовой высокопрочной стали 49
Давыдов Н.И. Медно-литейная пластика XXI века 51

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

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

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.

© ОАО "Издательство "МАШИНОСТРОЕНИЕ", "Заготовительные производства в машиностроении", 2007

SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

BLANKING PRODUCTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

(Forging and stamping, foundry and others productions)

№ 10 October 2007

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

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

Editorial Assistants
KLEYZER P.E.

Editorial Committee:
BELYAKOV A.I.
BLANTER M.S.
BOGATOV A.A.
BOKOV A.A.
GROMOV V.E.
GUN I.G.
ZHESTKOVA I.N.
ZARUBIN A.M.
KAPUSTIN A.I.
KASATKIN N.I.
KOSHELEV O.S.
CRUCK A.T.
MOROZ B.S.
MURATOV V.S.
NAZARYAN E.A.
OVCHINNIKOV V.V.
PASECHNIK N.V.
POVAROVA K.B.
POLETAEV V.A.
SEMENOV B.I.
SUBICH V.N.
TREGUBOV G.P.
TRUKHOV A.P.
SHATULSKY A.A.
SHERKUNOV V.G.
YAKOVLEV S.S.
YAMPOLSKY V.M.

This issue prepared with assistance of specialists:
DYUBKOVA N.V.
BELAVENTSEV R.Yu.
SERIKOVA E.A.

Journal is registered in State Committee of Russian Federation on printing. The certificate of registration ПИ № 77-12218 from 29.03.02

An advertiser is responsible for the promotional materials

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

Ph.: (495) 268-47-19, 268-69-19
Fax: (495) 269-48-97
Http://www.mashin.ru
E-mail: zpm@mashin.ru

CONTENTS

Casting and Welding Productions

Mazzarelli Giovanni, Mazzarelli Giuseppe, Belyakov A.I., Saifaev S.G., Belyakov A.A. Foundry productions LLC «Metallitmash» . . . 3
Semenov V.I. Key factors of dendrite structure adaptation to unidirectional heat sink in castings . . . 7
Karabanov V.V. Noncapillary soldering – new stage of soldering production theory and practice developement . . . 14
Creation of shotblast units on LLC "Amurlitmash" . . . 20

Forging and Stamping Productions

Demin V.A., Shestakov N.A., Subich V.N. Yelding in envelopes . . . 22
Mamaev V.B. Influence of the form of axially symmetrical blanks on material and energy consumption during forging in open stamps . . . 26
Levanov A.N. Common reguliarities and useful effects of contact friction in the processes of working metals by pressure . . . 31

Rolling and Drawing Productions

Arsentieva N.S., Zheleznyak L.M., Bokov N.F., Dashkevich O.N., Kuzmina E.V., Glukhova O.L. Manufacture of electrical copper non-standard strip on the JSC "Kamensk-Uralsky non-ferrous metal working plant" . . . 36
Semenov I.E., Ryjenko S.N., Povorov S.V. Dynamic modelling of the local bending-forming process for the technologies of roof coverings production . . . 40

Physical Metallurgy and New Materials

Filippov A.A., Pachurin G.V. Temperature of isothermal quenching of calibrated rolled metal of 40X steel for the cold upset . . . 44
Fokin B.V. Fractography and strength of ceramics on the basis of silicon nitride . . . 46

Information

Chertov V.M. Manufacture of the fine blanks of thin-sheet high-strength steel . . . 49
Davydov N.I. Copper cast plastics of XXI-th century . . . 51

Journal is included into the list of the Higher Examination Board for publishing the results of thesises for competition the academic degrees

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

© "Mashinostroenie Publishers", "Blanking productions in mechanical engineering", 2007

Джованни Маццарелли, Джузеппе Маццарелли, А.И. Беляков, А.Г. Сайфаев, А.А. Беляков *(ООО "Металлитмаш", г. Коломна)*

Литейное производство ООО "Металлитмаш"

Приведены этапы проведения модернизации литейного производства ООО "Металлитмаш". Представлены современное оборудование и технологические процессы, а также типовые отливки, изготовляемые на предприятии для различных отраслей машиностроения, и художественное литье.

The article considers the upgrading of caster LLC "Metallitmash". The paper contains the presentation of modern equipment and technological processes and also the typical castings for machine-building industry and art casting.

ООО "Металлитмаш" – это чугунолитейное производство, оснащенное современным высокопроизводительным оборудованием, изготовляющее и реализующее отливки для различных отраслей народного хозяйства из разных марок чугунов и сталей. ООО "Металлитмаш" – предприятие со 100%-ным иностранным капиталом (Metals & Machinery Industries Ltd., Великобритания).

Завод расположен в г. Коломне Московской области. Предприятие создано на базе металлургического производства бывшего "Коломенского завода тяжелых станков" в 2000 г.

ООО "Металлитмаш" – растущее предприятие, имеющее богатый производственный опыт по изготовлению отливок различной массы из чугуна и цветных сплавов в разовые и металлические формы, а также центробежным способом, накопленный десятилетиями на ПО "Коломенский завод тяжелых станков".

Успехи и достижения в работе предприятия определяются прежде всего высоким творческим потенциалом и высокой ответственностью его сотрудников. В настоящее время на предприятии работает один канд. техн. наук, двое сотрудников готовят к защите кандидатские диссертации; они также готовят к изданию монографию по производству отливок из чугуна с шаровидным графитом, обобщающую собственный опыт, опыт других предприятий и ученых России и зарубежья.

В 2006 г. на ООО "Металлитмаш" создана служба маркетинга, позволившая выиграть следующие тендеры: изготовление отливок для музея-заповедника Царицыно, реставрация чугунной лестницы на колокольне Ивана Великого в Кремле и др.

Литейное производство ООО "Металлитмаш" представлено пятью подразделениями: чугунолитейный цех мелкого и среднего литья, чугунолитейный цех тяжелого литья, копровый и модельный цеха и строящийся механический цех.

В настоящее время чугунолитейный цех мелкого и среднего литья является основной заготовительной базой предприятия и при 2-сменном рабочем графике выпускает около 6000 т отливок в год. Особенностью производства является многономенклатурность и разносерийность. В литейном цехе производят отливки из чугунов с пластинчатым графитом марок СЧ15...СЧ30, шаровидным графитом марок ВЧ 40...ВЧ 60 и специальных чугунов марок ЧХ16М, ЧЮ22Ш и др.

Чугунолитейный цех мелкого и среднего литья технологически подразделяется на три основных участка: плацевый, конвейерный и обрубной.

На ООО "Металлитмаш" намечены следующие этапы развития литейного производства.

Реконструкция конвейерного участка. В настоящее время на конвейерном участке мелкого и среднего литья установлена автоматическая формовочная линия фирмы Belloi & Romagnolli (Италия) с размером опок в свету 1000×800×300/300 и производительностью 100...120 форм/ч. Линия работает в режиме непрерывного цикла, т.е. формовка, простановка стержней, за-

ливка, охлаждение и выбивка форм происходят параллельно на литейном конвейере.

С установкой автоматической формовочной линии потребовалась полная реконструкция землеприготовительного отделения. К концу 2007 г. будет проведена замена старого смесеприготовительного оборудования на новое с полной автоматизацией и контролем смесеприготовления.

Формовочная смесь является основным фактором, от которого зависит качественное выполнение формовки, а следовательно, и качество отливки. На участке смесеприготовления будет установлено следующее оборудование: охладитель-гомогенизатор периодического действия для охлаждения формовочной смеси с контролем температуры и влажности; бункера для хранения формовочной смеси; смеситель интенсивного перемешивания фирмы Belloi & Romagnolli (Италия) производительностью 90 т/ч.

Устанавливаемый смеситель оснащен мощным и надежным поршневым гидромотором. Перемешивающий блок включает в себя два вращающихся узла, которые, помимо вращения вокруг своей оси, перемещаются, перекрывая всю поверхность ванны. Конструктивные элементы смесителя представлены на рис. 1. Установленные в перемешивающем блоке высокоскоростные роторы обеспечивают быструю активизацию добавок.

За счет использования на каждом вращающемся узле планетарного редуктора процесс перемешивания

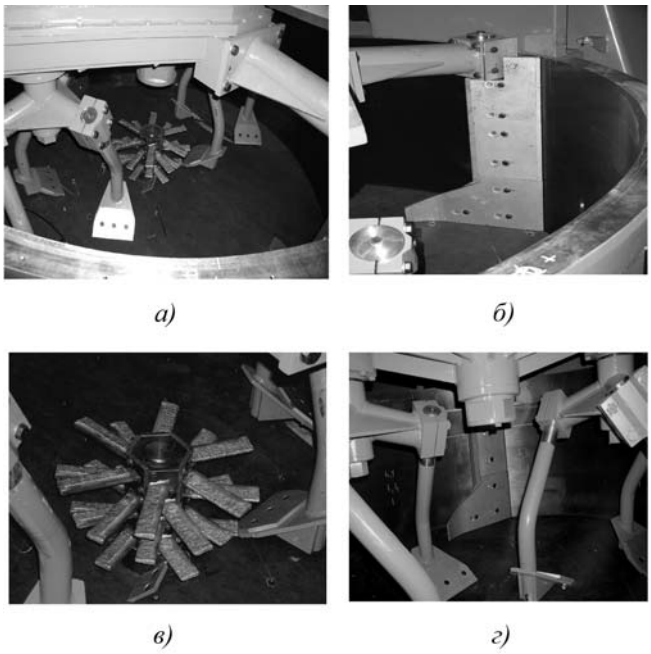


Рис. 1. Конструктивные элементы смесителя:
а – общий вид внутреннего пространства смесителя; *б* – скребок, очищающий стенки смесительной ванны; *в* – высокоскоростные перемешивающие роторы; *г* – вращающиеся узлы, состоящие из трех лопастей со скребками, подчищающими поверхность дна ванны

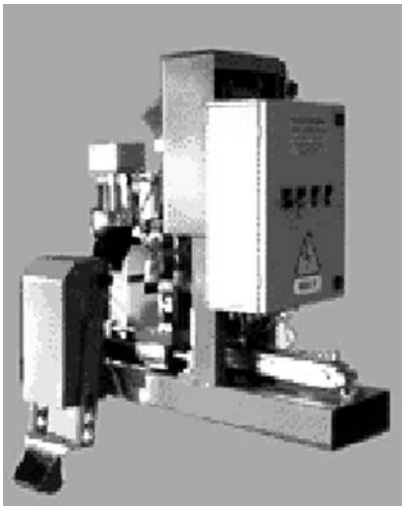


Рис. 2. Система автоматического контроля качества формовочной смеси GSC

осуществляется с высокой скоростью. Каждый вращающийся узел состоит из трех перемещающихся лопастей с полотнами – скребками, подчищающими поверхность дна ванны. Все рабочие элементы снабжены износостойкими накладками. Чистота стенок смесительной ванны поддерживается двумя скребками, которые также оснащены острыми накладками из износостойкого материала.

Для контроля приготовляемой смеси смеситель и охладители оснащены устройством автоматического контроля формуемости, прочности и влажности сырых формовочных смесей, бентонитов (GSC) (рис. 2).

Система автоматического контроля качества формовочной смеси GSC управляет работой бегунов, осуществляет дозированную подачу воды и ввод добавок, обеспечивая таким образом производство неизменно качественной формовочной смеси.

На автоматической линии в настоящее время освоено производство ответственных отливок для автомобильной промышленности (картер, ступицы, кронштейны из чугуна ВЧ 40, тормозные барабаны для автобусов и грузовых машин из чугуна СЧ25), станкостроительное литье (каретки, муфты, шкивы и др. из чугунов СЧ20 и ВЧ 45), машиностроительное литье (фланцы, колеса и др.), арматурное литье (диски, фланцы из чугуна ВЧ 40 и др.) массой 1...100 кг.

Реконструкция плаца и стержневого участка. *На плацу* производят крупное (до 10 т) и среднее чугунное литье, выполняют разовые и мелкосерийные заказы. Крупное и среднее литье изготовляют в формы и стержни из холоднотвердеющих смесей (ХТС-альфасет-процесс). На участке установлен двухрукавный шнековый смеситель фирмы Sogemi (Италия) максимальной производительностью 30 т/ч.

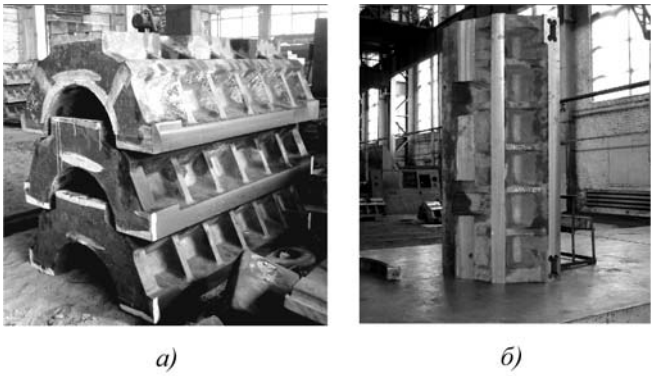
Формы и крупные стержни делают из ХТС на основе жидкого стекла, отверждаемого сложным эфиром – ацетатами этиленгликоля, освоенным работниками предприятия в сотрудничестве со специалистами ОАО НПО "ЦНИИТМАШ".

На плацу отливают заготовки для станкостроительной промышленности (станины, передние и зад-

ние бабки и др.), металлургической промышленности (вкладыши, пуансоны (из чугуна ЧХ16М2, матрицы, шибера, тормозные желоба и др.) и других отраслей (рис. 3–5).

Реконструкцию стержневого участка проводят с установкой современных стержневых машин. В настоящее время стержни для автоматической линии изготовляют на двух пескострельных стержневых машинах фирмы Primafond (Италия) с камерами объемами 0,01 и 0,03 м^3. Одна из машин показана на рис. 6. На данных машинах стержни изготовляют по cold-box-amin процессу.

В дальнейшем предусмотрена покупка еще трех стержневых машин. Полная реконструкция стержневого участка обеспечит высокое качество поверхности отливок, уменьшение затрат на производство за счет снижения расхода электроэнергии, снижение брака на 20...30 %, снижение трудоемкости финишных операций, улучшение экологических показателей.



а) *б)*

Рис. 3. Вкладыши из чугуна ЧГДШ массой 7 т:
а – в литом состоянии; *б* – после механической обработки

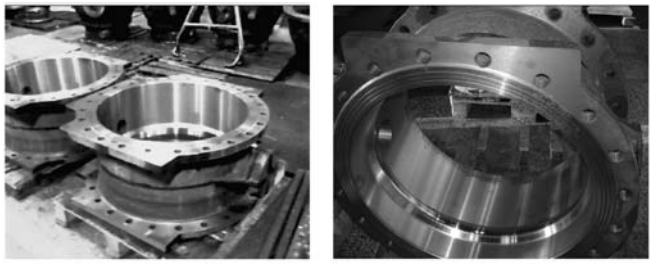
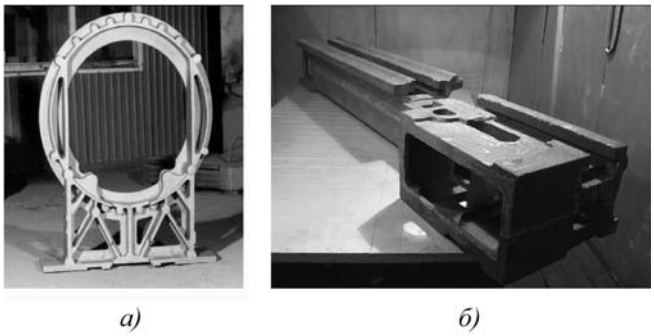


Рис. 4. Запорная арматура диаметром 400 мм и массой 150 кг из чугуна ВЧ 40



а) *б)*

Рис. 5. Узел сочленения из чугуна ВЧ 50 массой 360 кг (*а*) и станина металлорежущего станка из чугуна СЧ25 массой 1,5 т (*б*)

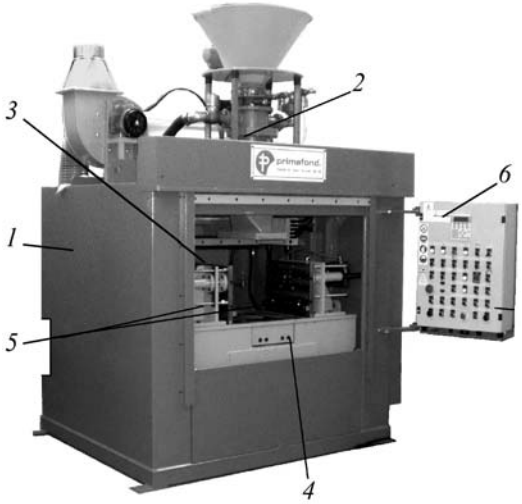


Рис. 6. Пескострельная машина для изготовления стержней по холодным ящикам с вертикальным разъемом типа SCB фирмы Primafond (Италия):
1 – несущая конструкция машины; *2* – надувное устройство; *3* – узел подачи сжатого газа; *4* – станина; *5* – зажимы; *6* – электрощит

Реконструкция обрубного участка. На участке обрубки установлено новое очистное дробеметное оборудование фирмы OMSG (Италия) проходного типа с вращающимися подвесками, марки Sandermatic (рис. 7). Установка туннельного типа с автоматическим циклом для обработки заготовок, подвешенных на вращающемся крюке.

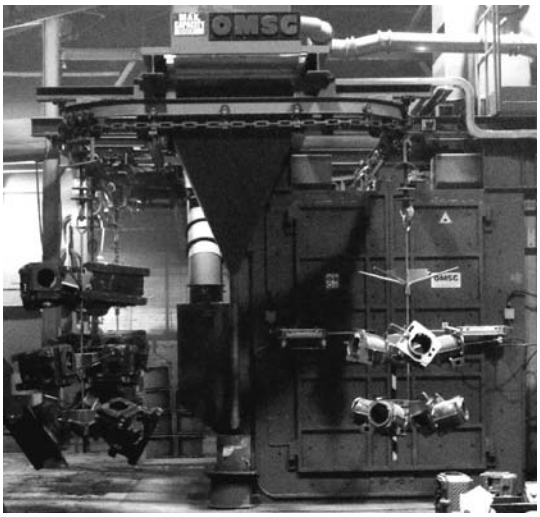


Рис. 7. Проходное дробеметное оборудование марки Sandermatic фирмы OMSG (Италия)

Точность определения химического состава чугунов различных марок на приборе ТГА "ЛИТИС"

Марка чугуна	Отклонения по определению содержания элементов, % мас.						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
СЧ15...СЧ30	±0,090	±0,17	±0,006	±0,004	±0,008	±0,042	–
ЧХ16М	±0,083	±0,04	±0,010	±0,001	–	±0,660	±0,043

Реконструкция плавильного отделения. В настоящее время чугунолитейный цех оснащен индукционной печью емкостью 6 т и двумя печами емкостью 1 т. При дальнейшей реконструкции плавильного отделения предусмотрена установка двух 32-тонных индукционных печей с автоматической заливкой.

Контроль химического состава и технологических параметров выплавляемых чугунов по ходу плавки осуществляют с помощью прибора термографического анализа "Литис". В таблице приведены данные по точности определения химического состава выплавляемых чугунов.

а)

б)

Рис. 8. Колокольня Ивана Великого в Кремле (*а*) и восстановленная чугунная лестница (*б*)

Технологические службы предприятия занимаются разработкой и внедрением прогрессивной технологии, модельно-литейной оснастки и материалов, средств механизации и автоматизации производственных процессов, технологического сопровождения действующего производства.

Специалисты предприятия проводят работы по модернизации производства и совершенствованию технологических процессов литейного производства. За последнее время проведены следующие мероприятия:

– приняты к использованию модификаторы для чугунного литья, позволяющие снизить отбел чугуна, стабилизировать механические свойства, улучшить обрабатываемость отливок;

– внедрены самовысыхающие противопригарные покрытия, способствующие улучшению качества поверхности отливок;

– внедрены фильтровальные сетки для чугуна из стеклоткани и керамики;

– внедрены термоизмерители погружного типа Digilance фирмы Heraeus Electro-Nite (Бельгия), повысившие точность замеров температуры металла;

– создан участок по изготовлению экзотермических втулок, позволивших повысить выход годного и качество чугунного литья из чугунов с шаровидным графитом и специальных.

ООО "Металлитмаш" выполняет заказы по изготовлению чугунного художественного литья. Например, совместно с ООО РПП "Таргет-Цель" была отлита и отреставрирована чугунная лестница на колокольне Ивана Великого в Кремле (рис. 8).

В модельном цехе изготовляют новые модели из дерева, металла и пластмассы, технологический инструмент и шаблоны, ремонтируют оснастку.

В копровом цехе разделывают и сортируют чугунный и стальной лом.

Полная реконструкция цехов мелкого и среднего литья позволит увеличить выпуск отливок до 30 000 т в год.

Джованни Маццарелли, президент предприятия;
Джузеппе Маццарелли, член совета директоров;
Алексей Иванович Беляков, зам. ген. директора, канд. техн. наук;
Александр Григорьевич Сайфаев, генеральный директор;
Алексей Алексеевич Беляков, зам. ген. директора по маркетингу

В.И. Семёнов *(МГТУ им. Н.Э. Баумана)*

Ключевые факторы адаптации дендритной структуры отливок к однонаправленному теплоотводу*

Рассмотрены ключевые факторы адаптации дендритной структуры к однонаправленному тепловому потоку при затвердевании отливок из сплава типа твердого раствора. Их уникальность заключается в принципе действия, проявляющемся в самих частицах расплава, который, создавая равновесие, адаптирует развитие необратимого кристаллизационного процесса таким образом, что одновременно с ростом кристаллов предельно минимизирует удельную энергию Гиббса первичного литого строения отливки.

The article considers the key factors of dendrite structure adaptation to unidirectional heat flow during crystallization of castings made of solid solution type alloys. The mode of functioning of these factors appears in the parts of a melt: it makes balance and tailors the evolution of irreversible crystallization process such way that simultaneously with the crystal growth it extremely minimizes the Gibbs soecific energy of primary cast structure of a casting.

Промышленные литейные сплавы созданы в большинстве случаев на базе двух компонентов. В расплаве компоненты сочетаются практически в любых долях, но в твердом состоянии их растворимость друг в друге обычно ограничена. Кристаллизация такого расплава начинается с образования первичных кристаллов, обогащенных избыточным компонентом. Преимущественным видом литого строения является дендритная структура, отличающаяся характерной неоднородностью химического состава, размерами кристаллов, ликвацией, усадочной пористостью и т.п. Как правило, дефекты литого строения трудно устранить последующей термической обработкой.

Одна из главных задач литейных технологий – создание такого воздействия на расплав, которое направляет процесс кристаллизации на получение однородной, мелкозернистой и плотной литой структуры. В этом направлении не прекращаются непрерывные изыскания. Хотя получено много положительных практических результатов, но не сложилось до сих пор единого мнения о механизме измельчения.

Наблюдая за ростом кристаллов, предпочитают использовать разумное с точки зрения здравого смысла предположение о существовании структурных центров кристаллизации. Зарождение новой фазы сопровождается появлением поверхности раздела. Так как поверхность раздела любого вещества обладает избыточной свободной энергией, то фазовое превращение связывают с образованием зародыша критического размера. При попытке создать математическую модель описания критического зародыша здравый смысл вступает в противоречие с началами термодинамики в виде термодинамического запрета на рост зародыша размером меньше критического. Это противоречие – главная проблема существующей теории кристаллизации.

Литые структуры в сплавах типа твердого раствора можно отнести к различному уровню развития дендритной кристаллизации. По А.А. Бочвару кристаллический дендрит представляет собой продукт роста из одного центра. Когда нормальный рост дендрита ограничивают скопления примесей, местные изменения химического состава, степень переохлаждения и т.д., то в эти моменты он образует ветви второго и высшего порядков. Бóльшая часть объема кристаллического зерна приходится обычно на ветви второго порядка.

Универсальным и высокоэффективным методом измельчения дендритного строения служит модифицирование. Разобраться в неучтенных факторах механизма модифицирования помогает то, что измельчение дендритного зерна не сопровождается изменением дендритного параметра. Если следовать той же концепции А.А. Бочвара, то справедливо допущение, что модифицирующие добавки ограничивают рост дендрита тем, что затрудняют образование новых ветвей. С уменьшением ветвей, но при том же дендритном параметре размер дендритного зерна становится меньше.

Новые способы "усиления зародышеобразования" позволили получить кристаллическое зерно, величина которого, равно как и ветвей дендрита, не зависит от других факторов, кроме скорости охлаждения. Размер зерна соответствует среднестатистическим размерам ветвей дендрита, т.е. дендритному параметру. Такое зерно является предельно мелким. В нем отсутствуют ветви, что говорит о предельном уровне развития дендритной кристаллизации.

* В порядке обсуждения.

В настоящее время в сплавах различных систем дендритное зерно получено в очень широком диапазоне скоростей охлаждения. Отмечено, что оно образуется даже в условиях свободного роста. Это еще больше усиливает предположение, что недендритное зерно не является продуктом роста из зародыша. Основной причиной образования недендритного зерна служит перегруппировка частиц центра кристаллизации – локального объема расплава, размер которого устанавливается самопроизвольно. При смене фазового состояния частицы центра кристаллизации диффузионным переносом находят себе новых соседей и занимают среди них устойчивое положение.

В сплаве действует механизм, стремящийся обеспечить предельную растворимость компонентов друг в друге. В жидкой фазе предельная растворимость компонентов выше, чем в твердой. Поэтому в момент наступления фазового превращения межатомная конфигурация частиц жидкой фазы центра кристаллизации теряет устойчивость, так как механизм предельной растворимости исчерпал свои возможности обеспечивать совместное существование частиц при имеющей место концентрации компонентов. Для восстановления устойчивости межатомной конфигурации он начинает изменять ее химический состав, отправляя диффузионным переносом "лишние" частицы к ее границам. Здесь "лишние" частицы накапливаются и образуют диффузные субграницы центров кристаллизации. Создание диффузных субграниц усиливает самообособление центров кристаллизации.

Механизм поддержания предельной растворимости компонентов жидкой фазы диффузионным переносом частиц непрерывно приближает химический состав субграниц к химическому составу твердой фазы. В этой новой межатомной конфигурации частиц диффузной субграницы начинает действовать свой механизм поддержания предельной растворимости компонентов. Используя избыточную энергию частиц, он упорядочивает согласно требованиям кристаллографической ориентации их взаимное расположение, создает диффузные квазикристаллические ячейки, выравнивает и ориентирует диффузные субграницы центров кристаллизации. Такие диффузные субграницы, понижая уровень избыточной свободной энергии своих частиц, могут становиться готовыми поверхностями раздела – гетерогенными границами двух фаз, так как удовлетворяют правилу фаз Гиббса.

Движущую энергию каждой частице дает энергия фазового перехода:

$$\Delta f = f^L - f^S, \qquad (1)$$

где Δf – избыточная свободная энергия; f^L и f^S – свободные энергии Гиббса соответственно жидкой и твердой фаз, приходящиеся на одну частицу. При диффузионном переносе работа силы энергии фазового перехода Δf не превращается в теплоту, а сохраняется при частице в виде энергии активации A:

$$A = \Delta f. \qquad (2)$$

Этот вид избыточной свободной энергии частицы имеет возможность взаимодействовать с тепловой энергией среды – диссипативным потоком тепловой энергии литейной формы. Энергия A создает параллельный диффузионному поток энергии активации. Как неотъемлемая составляющая частиц энергия активации накапливается в диффузных субграницах центров кристаллизации.

Чтобы минимизировать накопление избыточной свободной энергии фазового перехода, силы энергии активации A создают диффузионный перенос частиц ортогонально тепловому потоку. Ортогональность – важнейший фактор независимого совместного протекания двух процессов, основанных на независимых физических явлениях – диффузии и теплопроводности. При однонаправленном тепловом потоке литейной формы диффузионный перенос и диффузные субграницы центров кристаллизации получают устойчивую ориентацию в начавшем кристаллизоваться расплаве.

Энергия активации A упорядоченных субграниц центров кристаллизации имеет возможность превращаться в тепловую энергию Q. Этот переход обратим, непрерывен на макроуровне и дискретен на уровне частиц:

$$\overline{A} + \overline{Q} = f^L + f^S, \qquad (3)$$

где $\overline{A}$ и $\overline{Q}$ – макропеременные, приходящиеся на одну частицу.

Равенства (1)–(3) определяют переходное агрегатное состояние расплава при смене фаз. Они показывают, что каждая частица расплава имеет два переходных состояния: диффузионное и тепловое. Переходные состояния следуют друг за другом. Время нахождения частицы в таком состоянии – это стадия фазового превращения. Стадии получают обратную последовательность при смене направления фазового превращения. Диффузионная стадия позволяет частице обрести новых соседей и занять среди них устойчивое положение. При затвердевании тепловая стадия фиксирует устойчивое положение частиц тем, что резко изменяется коэффициент диффузии. Обратное изменение коэффициента диффузии при плавлении открывает частицам возможность к более свободному расположению в жидкой фазе.

Согласно указанных равенств, кристаллизация и плавление представляют собой эволюционные процессы. Их эволюция направлена в сторону, предписываемую вторым началом термодинамики. В общем случае эволюционные изменения при плавлении и кристаллизации можно описать с помощью вариации удельной функции Гиббса, которая для структур

адаптации структурообразующего процесса стремится к минимуму [2]:

$$\overline{\widetilde{G}}_i^{im} = \frac{1}{V}\int_0^V \frac{1}{\rho^{im}} f^{im}\, dxdydz \to \min, \qquad (4)$$

где $\overline{\widetilde{G}}_i^{im}$ – удельная энергия Гиббса; V – объем системы; ρ^{im} и f^{im} – соответственно плотность массы и плотность избыточной свободной энергии произвольного im-образования i-го структурного уровня; черта над величиной G означает, что $\overline{\widetilde{G}}_i^{im}$ является удельной величиной (относящейся к макрообъему); символ "~" подчеркивает гетерогенный характер сплава при плавлении и кристаллизации; нижний индекс i относится к структурам адаптации, состав которых постоянно меняется во времени.

Функция (4) учитывает только те межмолекулярные (атомные) взаимодействия, которые обусловлены определенной (ограниченной) потенциальной энергетической возможностью структур.

В состоянии адаптации расплав минимизирует удельную энергию Гиббса $\overline{\widetilde{G}}_i^{im}$ в целом через отдельные структуры. Развиваясь согласно этому правилу, структурообразующий процесс сам делает "весь выбор". Действие сил избыточной свободной энергии проявляет себя в виде термодинамического, кинетического и структурного факторов. Эти действия избыточной свободной энергии зависят от способности частиц к возбуждению (под этим понимается способность реагировать даже на сравнительно малые доли энергии).

Рассмотрим адаптацию дендритной структуры к скорости охлаждения в отливках из сплава типа твердого раствора. Исследования показывают существование в отливках трех структурных зон (рис. 1). Непосредственно у поверхности возникает слой мелких неориентированных кристаллов. Следующий за ним слой расплава кристаллизуется в виде столбчатых кристаллов. В самом центре тела отливки столбчатые кристаллы уступают место равноосным кристаллам. Расположение зон связано с замедлением скорости расплава. Протяженность зон определяет скорость внешнего теплоотвода.

Шероховатая поверхность литейной формы вызывает в первые моменты взаимодействия в пристеночном слое расплава высокий, но разный по направлению градиент температуры и соответствующую скорость охлаждения. От одного макрообъема к другому эти параметры меняются. Такая адаптация к условиям охлаждения позволяет рассматривать макроструктуру пристеночного слоя. Для каждого макрообъема будет свой энергетический барьер, контролирующий самообособление центров кристаллизации. В пределах макрообъема вариация энергетического барьера самообособления микрообъемов минимальна.

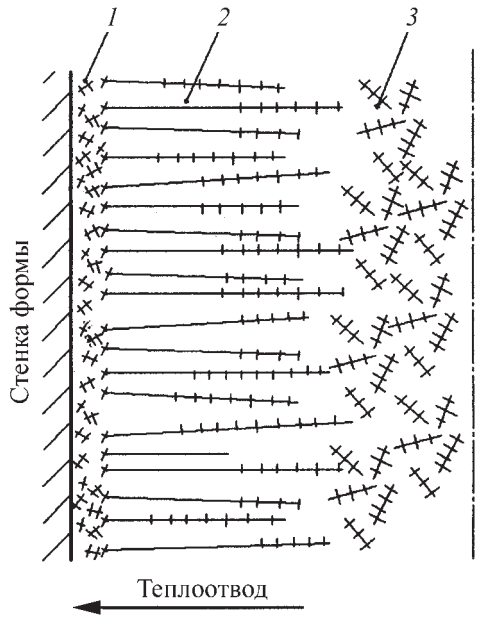


Рис. 1. Структура отливки из сплава типа твердого раствора: *1* – пристеночная зона; *2* – зона столбчатых кристаллов; *3* – зона равноосных кристаллов

На рис. 2, *а* изображен фрагмент пристеночного слоя в виде группы соседних макрообъемов, границы которых показаны условно сплошной линией. Струк-

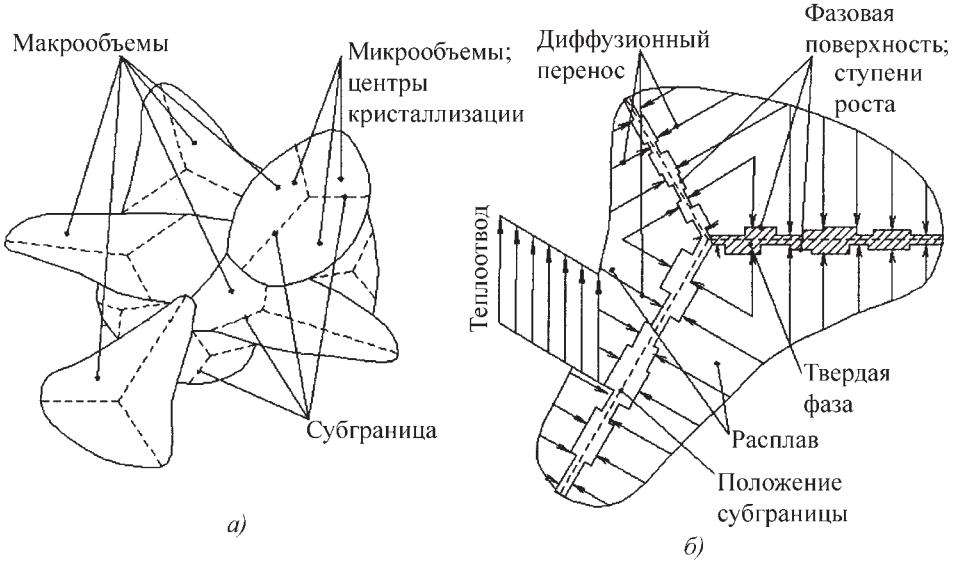


Рис. 2. Зарождение (*а*) и рост (*б*) кристаллического зерна пристеночного слоя

туру пристеночного слоя определяют совместно термодинамический и кинетический факторы.

В пределах макрообъема энергетические характеристики самообособления центров кристаллизации близки. Поэтому процесс самообособления, начавшись в любом микрообъеме, распространяется сразу на весь макрообъем. Субграницы микрообъемов – центров кристаллизации – показаны условно штрихпунктирной линией. Термодинамический фактор самообособления центров кристаллизации создает в пристеночном слое второй структурный уровень. Этот структурный уровень создается в каждом макрообъеме независимо, так как распространению процесса самообособления мешает другая высота энергетического барьера соседнего макрообъема.

На рис. 2, *б* изображено сечение макрообъема плоскостью, которая ортогональна теплоотводу, установившемуся к рассматриваемому моменту времени. В этой плоскости и параллельно ей действуют термодинамические силы диффузионного переноса "лишних" частиц, способных придать неустойчивость конфигурации расплава центров кристаллизации. Направление диффузионного переноса показано стрелками. Частицы, участвующие в диффузионном переносе, не мешают друг другу. Каждая имеет свою траекторию движения, и ни одна траектория не пересекает другую. Процесс переноса быстро устанавливается, а время переноса частицы минимально.

Двухсторонний диффузионный перенос ускоряет образование субграниц. Одновременно он же их выравнивает силами энергии активации, которые вдоль субграниц должны быть уравновешены. По выровненным субграницам силы энергии активации начинают формировать диффузные квазикристаллические ячейки и тем самым возбуждают силы кристаллографической ориентации. Термодинамический фактор обеспечивает превращение упорядоченного множества частиц диффузной субграницы в гетерогенную границу – фазовую поверхность.

Поскольку все частицы диффузной субграницы уравновешены, то она представляет собой некоторый переходный слой, термодинамические свойства которого непрерывно изменяются по нормали к поверхности вдоль его толщины от плотности энергии жидкой фазы к плотности энергии твердой фазы, где необходимый для этого избыток свободной энергии обеспечивает энергия активации A частиц. Дополнительная энергия взаимодействия фаз уже находится в диффузной субгранице. Поэтому переход диффузных ячеек в кристаллические идет согласно формуле (3), т.е. избыточная энергия активации A частиц в полном объеме переходит в тепловую энергию Q.

Переходный слой не исчезает, а продолжает существовать при гетерогенной границе. Гетерогенная граница и переходный слой совместно образуют диффузную фазовую поверхность.

Диффузионный перенос непрерывно изменяет положение фазовой поверхности и ее геометрическую форму. Гетерогенная граница распадается на ступени роста, являющиеся как бы стопками, сложенными из большого числа двухмерных фаз – сотен и даже тысяч молекулярных (атомных) листов. Формированию ступеней роста способствует неравномерная плотность диффузионного переноса и скопления неупорядоченных частиц, ограничивающие трансляцию диффузных ячеек.

Движение фазовой поверхности ограничено пределами макрообъема. Свободная энергия твердой фазы соседних макрообъемов эквивалентна. Наличие диффузной границы ограничивает взаимодействие твердых фаз соседних макрообъемов. Оно должно совершаться через энергетический барьер, отвечающий сгущению свободной энергии в диффузном слое. Смыкающиеся диффузные слои соседних макрообъемов образуют границы зерен, а избыточная энергия диффузных слоев полностью запасается в виде избытка сгущения свободной энергии в поверхностном слое зерен.

Рост кристаллического зерна происходит при непрерывном уменьшении площади диффузной поверхности. Поэтому структуры адаптации макрообъемов обеспечивают минимизацию удельной энергии Гиббса $\widetilde{G}_i^{im}$ (4) по каждому центру кристаллизации и всему макрообъему в целом.

Следующий вывод касается границ макрообъемов и микрообъемов – центров кристаллизации. Физические границы тех и других формируются благодаря развивающемуся в расплаве диссипативному тепловому потоку. При понижении температуры среды частицы отдают избыток тепловой энергии. Расставаясь с избытком тепловой энергии, все частицы межатомной конфигурации макрообъема продолжают находиться в равных энергетических возможностях при образовании связей с себе подобными. Для определенной группы частиц такая возможность теряется, когда возникает неустойчивость. Межатомная конфигурация восстанавливает свою устойчивость путем избавления от "лишних" частиц – удаления их в специальные зоны. Каждая "лишняя" частица и любое даже самое малое их диффузное образование устойчиво в расплаве благодаря энергии активации. Силы энергии активации упорядочивают расположение частиц диффузного образования. Благодаря притоку новых частиц диффузное образование развивается в диффузную субграницу октаэдрической формы микрообъемов, самопроизвольно обеспечивая соответствие массопереноса теплопереносу. Там, где соответствие нарушается, происходит ветвление диффузной субграницы – возникают новые границы. В зависимости от складывающихся условий центры кристаллизации получают замкнутые или разомкнутые диффузные границы. На рис. 2 показаны центры кристаллизации с разомкнутыми субграницами.

Вся субграница от зарождения до установления равновесной формы состоит из активных частиц,

имеющих при себе дополнительные энергетические возможности участвовать в образовании новой межатомной конфигурации. Можно говорить, что роль состояния среды при зарождении новой фазы состоит в формировании активных частиц, которые благодаря дополнительной энергии активации могут устойчиво существовать и "тратить" энергетические возможности вместе с себе подобными на развитие необратимого самоорганизующегося процесса по принципу минимизации избыточной свободной энергии каждой структуры всех уровней.

При литье в металлические изложницы в очень тонком пристеночном слое нередко формируется развитая поверхностная дендритная структура, так называемые поверхностные дендриты. Их можно отчетливо различать даже на неполированной поверхности отливки благодаря усадке расплава между их ветвями. Макроструктура сечения показывает, что дендриты располагаются непосредственно у поверхности.

В этих условиях ведущим среди других факторов также остается скорость охлаждения расплава. За счет более гладкой поверхности формы однонаправленный теплоотвод устанавливается раньше, чем расплав пристеночного слоя переходит в метастабильное состояние. Термодинамическое состояние расплава выровнено почти по всей поверхности. Здесь сохраняется тот же принцип образования структур расплава, в котором более важную роль играет вариация времени появления первых диффузных образований "лишних" частиц и скорость распространения – "роста" диффузных частиц вдоль поверхности формы. Эволюционное развитие субграницы направлено к тому, чтобы охватить максимальную площадь. В соответствии с формулой (4) это развитие фазового процесса максимально минимизирует избыточную энергию границ зерен.

Большой интерес в научном и практическом плане представляет кристаллизация расплава при увеличенных скоростях охлаждения. В общем случае размер зерна уменьшается, но дендритное строение сохраняется.

Дальнейшее повышение скорости охлаждения усиливает влияние термодинамических факторов при диффузионном переносе. Поток частиц становится более плотным, но менее выровненным относительно направления теплопереноса. Растут энергетические затраты на диффузионный перенос, который опять же запасается при частицах в виде дополнительного избытка энергии активации. Стремясь понизить свой высокий уровень активности, самопроизвольно еще в потоке частицы начинают взаимодействовать, создают изолированные наногруппы кристаллических ячеек. Из-за недостатка энергии активации субграницы центров кристаллизации формируются не полностью, а диффузионный перенос отражается в их субструктуре.

В ряде случаев меняется сам характер перехода в метастабильное состояние межатомной конфигурации центра кристаллизации. Эволюционное развитие предельно малого диффузного образования "лишних" частиц изменяется на "взрывное" действием термодинамических сил, которые резко повышают осмотическое давление в его пределах. Процесс самообособления центров кристаллизации в этих условиях ведет к образованию дендритов в форме сферолитов. Могут появляться бездендритные участки, от которых в радиальном направлении развивается ячеистая структура.

При сверхкритических скоростях охлаждения изменяется способ упорядочивания частиц межатомной конфигурации. Действие термодинамических сил блокируется тем, что частицы теряют активность сразу при диффузионном переносе. Шкала времени диффузионного переноса частицы увеличивается на несколько порядков изменением величины коэффициента диффузии с жидкого состояния на твердое. Центры кристаллизации получают ту кристаллическую структуру, которая обусловлена метастабильным состоянием межатомной конфигурации, а избыточная энергия фазового перехода сохраняется в виде несовершенств кристаллической структуры.

Главный вывод из сделанного рассмотрения следующий. Отвечая стремлению максимально использовать ограниченные энергетические возможности, избыточная энергия фазового перехода создает условия для направленного диффузионного переноса, определяя "лишним" частицам возможность заполнять только строго определенные участки пограничной поверхности центров кристаллизации для ускорения эволюции диффузной субграницы. Тем самым при выборе пути эволюции системы закон существенности слабых взаимодействий создает способ действия, позволяющий "охватывать" расплав в критическом состоянии минимальным числом самостоятельных диффузных границ максимальной площади, где последующие эволюционные изменения в системе с наибольшей эффективностью минимизируют избыточную энергию Гиббса.

Данное положение проявляет себя в полной мере и нагляднее, определяя образование и рост столбчатых кристаллов. Непосредственно за пристеночным слоем разориентированных кристаллов устанавливается однонаправленный теплоотвод с параллельным пристеночному слою диффузионным потоком свободных активных "лишних" частиц. Совместным действием они создают участки субграниц микрообъемов, объединяют их в одну общую, первоначально плоскую и предельно тонкую субграницу, стабилизируют ее и придают ей вид сетки с сотовыми ячейками (рис. 3).

Регулярная сотовая субграница определяет условия деления однородной гомогенной среды за слоем пристеночных кристаллов на самоподобные *im*-структуры, способные возникать, существовать и адаптироваться к установившемуся однонаправленному теплоотводу. Развитая поверхность сотовой субграницы обладает значительным избытком свободной энергии.

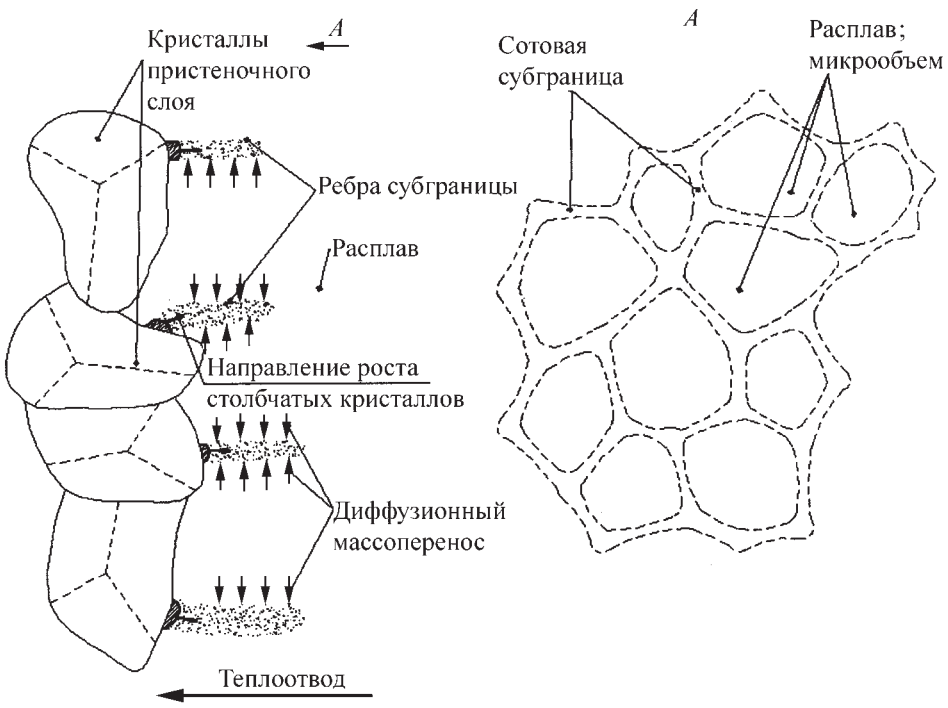


Рис. 3. Строение диффузной субграницы за слоем пристеночных кристаллов

Условием устойчивого ее существования служит минимизация поверхностной энергии за счет уменьшения площади поверхности к объему, что самопроизвольно ускоряет накопление свободных "лишних" частиц вдоль ее сотовых ребер.

Ориентированные диффузные образования ребер субграницы при участии кристаллов пристеночного слоя как подложек, с которыми могут взаимодействовать активные частицы, при полном соответствии их кристаллических решеток с кристаллизующейся фазой, создают зачатки столбчатых кристаллов. Зачатки наследуют кристаллографическую ориентацию от кристаллов пристеночного слоя. Эти же диффузные образования ребер ускоряют рост ориентированных навстречу теплоотводу зачатков, тормозят рост зачатков других направлений, что ведет к их выклиниванию за счет отставания в росте. Взаимодействие сил энергии активации частиц с силами диссипативного однонаправленного теплоотвода создает надежный способ управления зарождением, количеством, кристаллографической ориентацией и ростом ориентированных столбчатых кристаллов из зачатков пристеночного слоя.

Рост зачатков столбчатых кристаллов превращает плоскую ячеистую диффузную субграницу за слоем пристеночных кристаллов в двухфазную зону с ячеистым фронтом кристаллизации (рис. 4). Границы двухфазной зоны определяет положение изотермических фронтов ликвидуса T_L и солидуса T_S. Сотовая субграница продолжает оставаться ключевым фактором, устанавливающим положение вершин столбчатых кристаллов. Все другие участки фазовой поверхности столбчатых кристаллов формируются прямым диффузионным массопереносом, который ортогонален теплоотводу. Все точки диффузной фазовой границы остаются одинаково выгодны для присоединения частиц, так как работа диффузионного переноса численно равна энергии фазового перехода – энергии активации частиц. На фронте солидуса стволы столбчатых кристаллов принимают окончательную форму и достигают окончательной толщины. Влияние интервала крис-

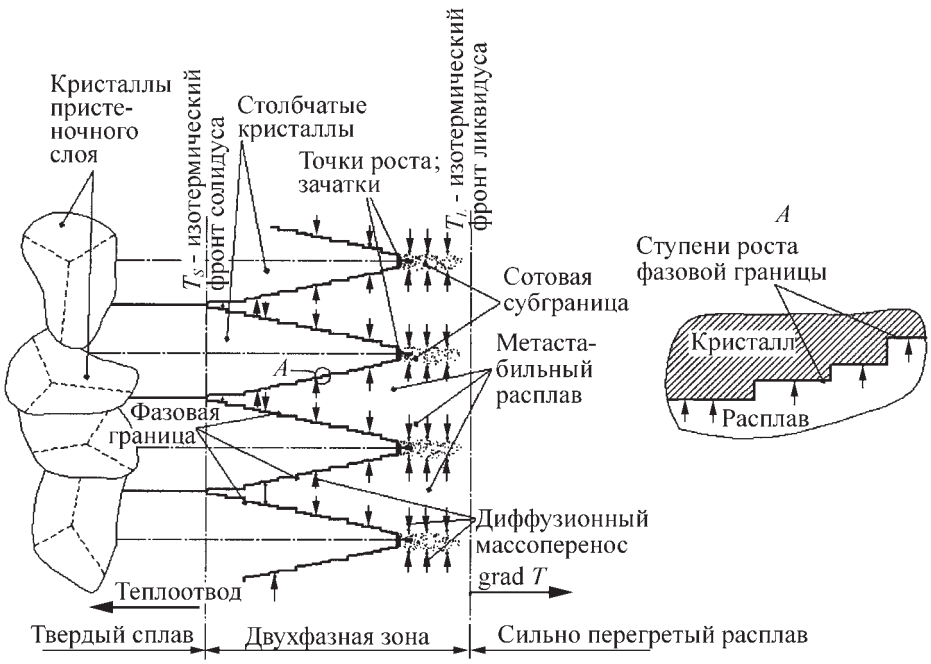


Рис. 4. Схема роста столбчатых кристаллов при сильно перегретом расплаве

таллизации сплава проявляет себя сужением или расширением двухфазной зоны.

Рост столбчатых кристаллов происходит при непрерывном снижении интенсивности однонаправленного теплоотвода. Двухфазная зона и субграница расширяются. Структуры адаптации субграницы должны соответствовать этим условиям. Все самопроизвольные процессы субграницы направлены на уменьшение площади ее поверхности. Процесс структурной адаптации ведет к укрупнению сотовых ячеек, что только усиливает выклинивание "слабых" столбчатых кристаллов, освобождая пространство более "сильным".

Отвод избыточной теплоты ведет к тому, что перед изотермическим фронтом ликвидуса T_L расплав становится слабо перегретым. Уменьшение градиента температуры на фронте ликвидуса снижает поступление дополнительной тепловой энергии в двухфазную зону. Одновременно уменьшается теплоотвод из двухфазной зоны и вместе с ним падает интенсивность диффузионного переноса частиц. Хотя суммарный запас энергии субграницы падает, он продолжает оставаться выше того уровня, при котором наступают необратимые структурные изменения.

Силы поверхностной энергии, стремящиеся сократить площадь поверхности субграницы, действуют независимо от сил диффузионного переноса. Снижение интенсивности поступления активных частиц ускоряет действующий процесс структурной адаптации в виде укрупнения ячеек субграницы. Возникающее противоречие разрешается образованием новых более мелких ячеек в пределах крупных. Этот процесс подобен образованию структурных центров кристаллизации в структурных макрообъемах пристеночного слоя. С этого момента времени образование дополнительных структур адаптации, обеспечивающих баланс энергии субграницы, становится периодическим процессом. Четкая периодичность обновления структур адаптации сотовой границы сопровождается образованием ветвей субграницы, на месте которых возникают ветви дендритов второго и высшего порядков (рис. 5).

Рамки рассмотренного повторяют еще раз способ действия объективного закона существенности слабых взаимодействий, когда встречаются трудности при выборе пути эволюции системы в критических точках. Минимально увеличивая удельный избыток энергии на образование новых *im*-структур в начале процесса, физико-химическая система получает возможность максимально минимизировать удельную энергию Гиббса $\overline{\widetilde{G}}_i^{im}$ при завершении процесса.

Величина, форма и взаимное расположение очередного слоя ветвей дендрита повторяют адаптированное строение диффузной сотовой субграницы, которая сформировалась перед фронтом кристаллизации в двухфазной зоне. Каждая ветвь формируется самостоятельной макроячейкой субграницы. Процесс структурной адаптации инициируют некомпенсированные силы поверхностной энергии ствола дендрита. Поэтому дополнительные субграницы начинаются от ствола и устанавливаются согласно его кристаллографической ориентации практически одновременно во всех прилегающих к нему макроячейках. Физико-химическая система использует способ действия, который идентичен по большинству признаков образованию поверхностных дендритов. Дендрит, таким образом, является как бы стопкой, сложенной, как колода карт, из большого числа плоских дендритов, структура которых меняется, адаптируясь к условиям теплоотвода. Стабилизация этих условий ведет к образованию регулярной дендритной структуры.

В центральной зоне при некотором критическом значении интенсивности теплового потока начинают преобладать равновесные условия кристаллизации. Диффузная сотовая граница получает возможность распространиться на всю эту зону. Она теряет устойчивость, так как самопроизвольные процессы в этом случае ведут к уменьшению ее поверхности. Когда плотность избыточной энергии субграницы не отличается от окружающего расплава, то при отсутствии внешних сил она

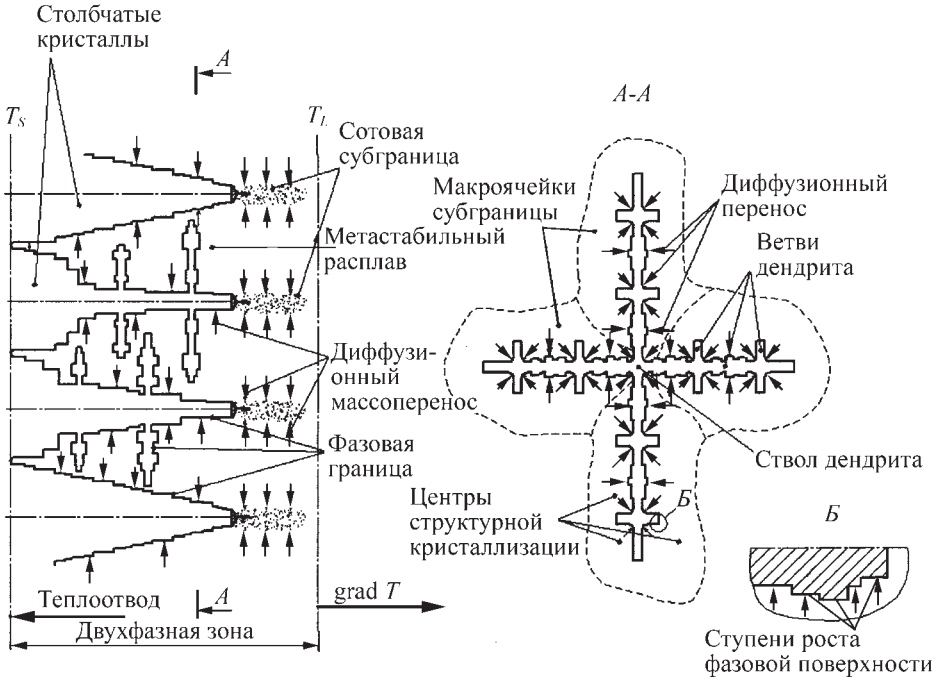


Рис. 5. Схема перехода от ячеистого к дендритному фронту кристаллизации

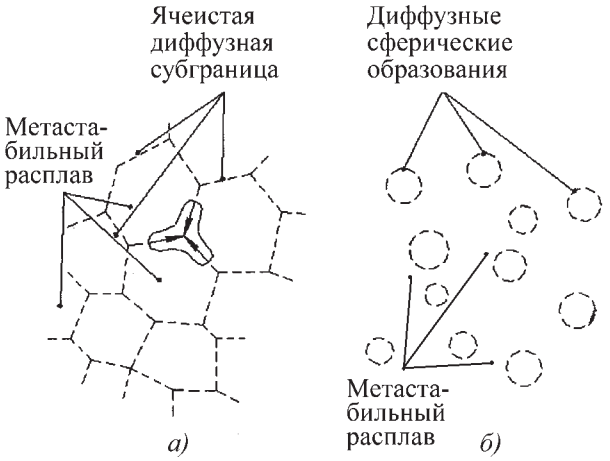


Рис. 6. Схема распада ячеистой диффузной субграницы (*а*) на сферические диффузные образования (*б*)

распадается на множество диффузных образований сферической формы (рис. 6).

Все диффузные образования способны быть зародышами, так как могут обеспечить образование кристаллических ячеек. Активными среди них становятся наиболее крупные и оказавшиеся в зоне с более интенсивным теплоотводом. Развитие необратимого процесса на принципе минимума удельной энергии Гиббса ведет к поглощению пассивных диффузных образований их активными соседями.

Кристаллографическая ориентация зародыша определяется местом зарождения, где решающее значение оказывает направление теплоотвода, но его влияние может изолироваться другими факторами. В самой глубине состояние расплава близко к равновесному, что обеспечивает образование крупных равновесных кристаллов. Сферу действия термодинамических сил кристалла устанавливает дендритный параметр. Все попавшие в сферу действия этих сил диффузные образования и даже мелкие кристаллы распадаются, получая соответствующий уровень энергии активации, и направляются к ближайшей гетерогенной поверхности.

Все это выражается в уникальном структурно-временном принципе действия, который заложен природой в частицы и который, создавая равновесие, способствует одновременно росту кристаллов и минимизации избыточной свободной энергии составляющих частей и всей системы в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Семёнов В.И.** Движущие силы и механизм затвердевания расплава // Металлургия машиностроения. 2005. № 5. С. 21–27.

2. **Семёнов В.И.** Механизм самоорганизации фазового превращения, обусловленный накоплением избыточной свободной энергии // Металлургия машиностроения. 2006. № 3. С. 24–29.

Вячеслав Иванович Семёнов, канд. техн. наук

В.В. Карабанов *(г. Железнодорожный)*

Некапиллярная пайка – новый этап развития теории и практики паяльного производства

Отмечен недостаток существующего определения пайки, изложенного в ГОСТ 17325–79, содержащего необходимость затекания припоя в зазор. Приведены многочисленные примеры широкого использования некапиллярной пайки, что подтверждает возможность пайки с любыми зазорами. Рассмотрены специфические процессы, протекающие при некапиллярной пайке в паяльном зазоре.

The article marks the weakness of the modern definition of soldering that is set out in GOST 17325–79 and contains the necessity of flowing of a solder into a hot clearance. Numerous examples of noncapillary soldering confirm the possibility of a soldering with every possible hot clearances. The article also considers the specific processes taking place during noncapillary soldering in hot clearance.

Существующая в настоящее время теория пайки ограничивается рассмотрением физико-химических процессов, протекающих в узких капиллярных зазорах, в которых расплав припоя удерживается от вытекания капиллярными силами. Такое отношение к пайке сложилось в результате традиционного ее применения при изготовлении небольших по размерам изделий (бижутерия, украшения, посуда), при сборке которых легко устанавливать узкие зазоры между соединенными деталями.

Такая искусственная привязка процесса пайки к узким капиллярным зазорам является устаревшей. Она резко снижает значимость этого прогрессивного способа соединения, предельно суживает область ее

возможного применения. Необоснованное отношение к пайке отразилось в соответствующей литературе и в ГОСТах. В определениях пайки не отражается сущность процесса пайки как процесса взаимодействия расплава припоя и твердого нагретого металла.

Так в ГОСТ 17325–79 приведено следующее определение пайки:

"Пайка – образование неразъемного соединения с межатомными связями путем нагрева соединяемых материалов ниже температуры их плавления, смачивания их припоем, затекания припоя в зазор и последующей его кристаллизации".

Содержащееся в определении указание на процесс затекания расплавленного припоя в зазор отражает традиционно сложившееся понятие о пайке как о процессе соединения небольших деталей, в узкие зазоры между которыми расплав припоя втягивается под действием капиллярных сил. Именно для таких зазоров и создавались все припои, применяемые в промышленности. В широкие открытые зазоры припой либо не будет затекать, либо будет выливаться из них.

Стремительный рост крупного промышленного строительства и постоянно возрастающие требования к надежности и качеству соединений приводили к необходимости применения при сооружении крупных металлоконструкций способа пайки, как наиболее полно отвечающего требованиям современного производства.

Для решения этой задачи необходимо было ликвидировать привязанность процесса пайки к узким зазорам, для чего разработали специальные припои широкого промышленного применения, предназначенные для пайки стальных изделий с широкими зазорами (до 1 мм). Такие припои (типа ПАН, П-87, П-100, П-65) обеспечивали качественное формирование паяного шва в широких зазорах, которые формировались при сборке крупных соединений (труб).

С созданием этих припоев начинается этап промышленного освоения некапиллярной пайки. Наиболее широкое применение некапиллярная пайка имеет с печным и индукционным нагревом. Индукционная пайка промышленных трубопроводов успешно вытесняет из этой области традиционные способы соединения – сварку и резьбу. Печная пайка обеспечивает получение соединений крупных конструкций, которые невозможно получить другими способами.

Основным вопросом при пайке крупных соединений является удержание расплава припоя в широком зазоре.

Отсутствие капиллярных сил в паяльном зазоре при некапиллярной пайке компенсируют искусственными приемами по герметизации широких зазоров, в частности, с использованием герметизирующего состава или сварки.

Оригинальное решение по удержанию расплава припоя в широком паяльном зазоре было найдено в Институте электросварки им. Е.О. Патона при разработке магнитной пайки стальных трубопроводов. Технология магнитной пайки заключается в следующем.

В широкий паяльный зазор (до 2 мм) телескопического соединения между концами соединяемых труб вносится равномерная порошковая смесь припоя ПАН-3 и тугоплавкого наполнителя (железный порошок). На стык устанавливают нагревательное устройство – кольцевую газовую горелку или индуктор. За пределами нагреваемой зоны на трубы устанавливают два постоянных кольцевых магнита.

После расплавления припоя магнитное поле удерживает частицы твердого наполнителя в зазоре. Эти частицы образуют между собой сеть капиллярных зазоров, в которых удерживается образующийся расплав припоя. При двух-трехкратном перекрытии концов труб в телескопическом соединении обеспечивается равнопрочность паяного соединения с металлом труб. Процесс магнитной пайки был успешно внедрен при строительстве жилых зданий в Москве.

При магнитной пайке наиболее ответственных изделий в качестве наполнителя используют порошковый кобальт, температура магнитных превращений (точка Кюри) которого составляет 1100 °С.

Другими способами удержания расплава припоя в широких зазорах является их герметизация специальным составом или сваркой. Первые эксперименты по печной пайке изделия с широкими зазорами показали уникальные результаты [1].

Проводили пайку телескопических соединений, состоящих из кольца высотой 40 мм и стержня диаметром 50 мм из стали 36Г2С, между которыми устанавливались зазоры 0,1...3,0 мм. Собранный стык укладывали вертикально на отрезок асбеста с нанесенной на него герметизирующей замазкой, состоящей из 65 % жидкого стекла, 30 % порошка оксида алюминия и 5 % измельченного асбеста. В асбестную воронку, закрепленную над зазором, засыпали порошок медно-марганцевого припоя П-65 (ОСТ 34-13-198–80) в количестве, необходимом для заполнения зазора. Пайку осуществляли в контейнере в среде аргона при температуре 950 °С.

Из паяных соединений вырезали диски высотой 10 мм и проводили их испытания на срез по паяному шву. Результаты испытаний показали, что при зазорах менее 0,3...0,5 мм паяные швы разрушались из-за наличия в них значительного непропая. При зазорах свыше 0,5 мм паяные образцы не разрушались даже при пределе прочности на срез 650 МПа, что вдвое превышает предел прочности исходного припоя на разрыв (330 МПа).

При испытаниях на срез образцов с широкими паяными швами (2...3 мм) определена их высокая пластичность. Угол сдвига паяного шва составил 30° (рис. 1).

Металлографический анализ швов, паяных с различными зазорами, показал, что при зазорах 0,1 мм кристаллизация припоя происходит с образованием одного ряда плоских зерен, что должно обеспечивать

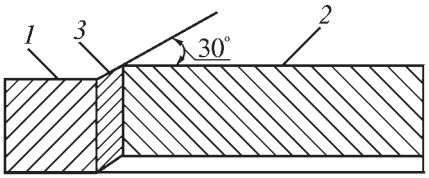


Рис. 1. Состояние образца телескопического соединения после испытания на срез:
1 – кольцо; *2* – диск; *3* – паяный шов

высокие механические свойства паяных соединений. Однако по мере удаления от места затекания припоя в зазор в шве возрастает количество и размеры участков непропая, что и обеспечивает снижение прочности паяного шва.

При зазоре 0,2 мм отмечена наиболее неблагоприятная структура паяного шва. Последовательный рост кристаллов ячеистой формы от зон спая обуславливает зональную неоднородность шва, где по его центральной части и проходят границы сросшихся кристаллов. При этом центральная часть шва сильно ослаблена и играет роль надреза. Здесь образуется слой легкоплавкой фазы.

При зазорах свыше 0,5 мм в шве образуется дендритная структура с развитой сеткой границ между кристаллами, разориентированными в пространстве, вследствие чего прочность соединения определяется прочностью припоя, закристаллизовавшегося в зазоре. По всему сечению шва отмечено наличие избыточной фазы в виде кристаллов на железной основе (50 % железа).

При заполнении зазора расплавом припоя происходит диспергирование зерен основного металла и перенос его частиц в массу расплава. Равномерное насыщение расплава припоя компонентами основного металла с выделением избыточной фазы способствует повышению прочности паяного шва по сравнению с прочностью исходного припоя при некапиллярной пайке.

Таким образом, исследования показали значительные преимущества некапиллярной пайки по сравнению с капиллярной. Если глубина затекания припоя в капиллярный зазор ограничена вследствие образования непропая, то при заполнении расплавом припоя широких зазоров газовые и шлаковые включения всплывают на поверхность и обеспечивается образование плотной, бездефектной структуры паяного шва.

Движение расплава припоя в зазоре приводит к его обогащению основным металлом, в результате изменяются состав и структура паяного шва, а также его механические свойства. Изучение закономерностей этого процесса и разработка способа управления им могут привести к значительной рационализации режима пайки и составов припоя.

Шов, образующийся при капиллярной пайке, считается хрупкой прослойкой. При некапиллярной пайке шов может быть высокопластичным, что резко повышает надежность паяного соединения.

Как показали разработки, проведенные в Институте электросварки им. Е.О. Патона, по пайке крупногабаритных биметаллических обечаек, глубина затекания расплава припоя в некапиллярные зазоры практически неограничена. Размеры паяемых обечаек следующие: диаметр 1200 мм; высота 2200 мм; зазор между обечайками 1 мм.

При пайке использовали специально разработанный припой на марганцевоникелевой основе ПАН-7, не растворяющий основной металл. Снизу зазор между обечайками герметизировали сваркой. Над зазором размещали около 8 кг припоя, устанавливали крышку и приваривали к обечайкам. Изделие помещали в печь, где происходила многочасовая пайка. Температура пайки составляла 1200 °С. Припой плавился и заполнял соединительный зазор.

При проведении этой разработки обнаружен автовакуумный эффект, который заключается в том, что при длительной высокотемпературной (свыше 1100 °С) пайке герметизированного зазора в нем происходит диссоциация (восстановление) оксидов и растворение газов (кислорода) в паяемом металле с образованием в зазоре вакуума, что исключает появление несплошностей. В результате происходит образование плотного паяного шва с пределом прочности на срез при 500 °С, равным 360...460 МПа.

Разработки по некапиллярной пайке позволили определить возможность и эффективность пайки изделий не только с глубокими, но и с широкими зазорами (свыше 2 мм) путем их заполнения композиционным материалом, состоящим из наполнителя в виде дискретных металлических неплавящихся частиц и связки из припоя, обеспечивающего сплошность в шве и соединение его с паяемым материалом [2].

Раздельный выбор свойств наполнителя и связки открывает широкие возможности для управления всеми свойствами паяного соединения и в первую очередь его прочностью и пластичностью. Целенаправленное легирование компонентов создает возможность управления растворно-диффузорным процессом между наполнителем и припоем в целях получения необходимой структуры паяного шва для обеспечения его равнопрочности с основным металлом.

Создав после герметизации паяльного зазора сваркой в нем вакуум, а при плавлении припоя над зазором избыточное давление нейтральных газов, достигают высокой плотности паяного шва. При пайке низкоуглеродистых и среднеуглеродистых сталей равнопрочные соединения образуются при использовании припоя ВПр2 и температуре пайки 1040 °С. Приведенная разработка явилась новым направлением в области высокотемпературной пайки изделий с широкими (свыше 2 мм) зазорами.

Развитие некапиллярной пайки происходило не только в направлении разработки технологий заполнения расплавом припоя широких и глубоких соеди-

нительных зазоров, но и в направлении создания припоев, предназначенных для пайки изделий с широкими зазорами.

Неоспоримым достижением было создание русскими учеными под руководством И.Е. Петрунина недорогого высокопрочного припоя на железной основе П-87 для пайки стальных изделий с зазорами до 1 мм. Появление этого припоя открыло широкие возможности для внедрения пайки в область сооружения крупногабаритных металлоконструкций. Высокие технологические свойства припоя позволили разработать технологию индукционной пайки труб для полевых условий. Температура пайки составляла 1200 °С.

Припой П-87 применяли для индукционной пайки обсадных колонн сечением 210×12 мм над устьем глубоких скважин (до 4000 м). На концах труб нарезались совмещаемые V-образные разделки с углом при вершине 60°. Порошковый припой в виде формованного кольца толщиной 1...1,5 мм вносился между разделками труб при их сборке. Контроль непосредственно соединительного зазора не производили. На собранный стык прикладывали осевую удельную силу сжатия 0,5...0,7 МПа. В процессе плавления припоя его прослойка уплотнялась, разделки труб сближались до положения, при котором гидравлическое сопротивление жидкой прослойки припоя уравновешивалось осевой удельной силой. Как правило, установившаяся толщина прослойки припоя составляла 0,4...0,5 мм.

При испытаниях на разрыв образцов паяных соединений труб отмечалась высокая стабильность предела прочности, равного в среднем 450 МПа. Разрушения происходили при достижении металлом труб предела текучести. В паяных швах отсутствовали видимые дефекты.

При индукционной пайке труб большого диаметра необходимо учитывать воздействие некоторых процессов на формирование паяного соединения. При индукционном нагреве концов труб в их продольном сечении возникают значительные температурные угловые деформации, препятствующие сближению разделок.

Электромагнитное поле индуктора оказывает силовое воздействие на расплав припоя, образующийся в широком зазоре, которое приводит к его перемешиванию и вытеснению на наружную поверхность труб. В паяном шве образуются крупные несплошности, а во внутренней части шва – горячие трещины [3]. Значительное растворение основного металла в припое П-87 при перемешивании может привести к отслоению обогащенного железом припоя от поверхностей разделок [4].

О степени влияния электромагнитного поля индуктора (электромагнитного перемешивания) на формирование паяного шва свидетельствуют резкие изменения состава припоя в швах торцевых соединений планок сечением 50×30 мм, паяных с широкими фиксированными зазорами 1...3 мм. В качестве припоев применяли марганец, образующий с железом неограниченные твердые растворы, припой П-87 на железомарганцевой основе (40 % железа) и медь, образующую ограниченные растворы с железом (таблица). Частота тока составляла 2,4 кГц. Средняя скорость нагрева 15 °С/с, температура пайки превышала температуру плавления припоев на 10 и 60 °С.

Содержание железа в зоне сплавления и прочность торцевых швов, паяных с широкими зазорами

Припой	Температура пайки, °С	Мощность нагрева, кВт	Выдержка, с	Паяльный зазор, мм	Среднее содержание Fe, %	Временное сопротивление, МПа	Концентрационное переохлаждение, °С
Марганец	1260	30	30	1	56	420	100
	1260	30	30	2	54	460	100
	1260	30	30	3	50	410	85
	1260	30	60	2	55	430	100
	1260	30	60	3	53	420	96
	1350	38	60	2	73	550	100
П-87	1145	18	30	1	41	390	–
	1145	18	–	2	40	390	–
	1145	18	30	2	43	390	–
	1145	18	60	2	51	460	–
	1145	18	30	3	47	440	–
	1200	23	30	2	60	560	80
	1200	23	60	2	71	580	100

Припой	Температура пайки, °С	Мощность нагрева, кВт	Выдержка, с	Паяльный зазор, мм	Среднее содержание Fe, %	Временное сопротивление, МПа	Концентрационное переохлаждение, °С
Медь	1090	15	30	1	3,3	450	–
	1090	15	30	2	2,3	440	–
	1090	15	30	3	2,3	460	–
	1090	15	60	1	3,2	470	–
	1090	15	60	2	2,3	480	–
	1090	15	60	3	3,4	420	–

Во всех случаях отмечено значительное и равномерное насыщение всей широкой зоны паяного шва железом вне зависимости от величины паяльного зазора и времени выдержки. При пайке припоем П-87 и марганцем достигнута высокая степень концентрационного переохлаждения расплава (80...100 °С). Особенно высокое насыщение зоны сплавления железом произошло при пайке порошковым марганцем при температуре пайки 1260 °С, что на 10 °С превышает температуру плавления марганца (содержание марганца в шве достигает 56 %, а при 1350 °С – 71 %) (рис. 2).

Следовательно, с повышением температуры пайки (с повышением удельной мощности нагрева) содержание железа в зоне сплавления возрастает. Это можно объяснить увеличением подвижности расплава припоя в зазоре. Несмотря на высокую степень концентрационного переохлаждения кристаллизации припоя не происходит при любой выдержке вплоть до отключения установки. Движение расплава препятствует зарождению устойчивых центров кристаллизации, росту и сращиванию зародившихся кристаллов.

При нагреве припоя П-87 до температуры, на 10...15 °С превышающей его температуру плавления, отмечается нестабильное и неравномерное насыщение его железом, что можно объяснить высокой вязкостью сплава, имеющего сложный состав. При перегреве припоя на 50...60 °С достигается концентрационное переохлаждение, равное 80...100 °С. Предельное насыщение припоев железом достигается при выдержке 30 с.

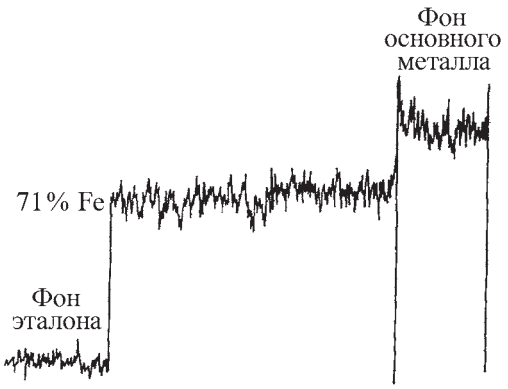


Рис. 2. Распределение железа по ширине паяного шва толщиной 3 мм

Особый интерес представляет предельное насыщение медного припоя железом. Металлографический анализ швов выявил по всему полю наличие избыточной фазы на основе железа.

Для предупреждения возникновения в паяном шве указанных дефектов при индукционной пайке труб применяют двойной индуктор или индуктор с вогнутой внутренней поверхностью, действие электромагнитных полей которого на область паяемого соединения ослаблено. Ширина индуктора должна обеспечивать отсутствие угловых температурных деформаций в стыке.

По разработанной технологии индукционной пайки паяные обсадные колонны опускали в глубокие бурящиеся скважины. Максимальная длина колонн достигала 2005 м, масса до 100 т.

При индукционной пайке двойным индуктором промысловых трубопроводов сечением 57×5 мм применяли косостыковую конструкцию соединения [5]. При сборке стыка между разделками труб зажимали коническое прессованное кольцо припоя П-87 (рис. 3). При угле скоса разделок 20° обеспечивалась равнопрочность паяного соединения с металлом труб с пределом прочности до 750 МПа.

Защиту наружной поверхности стыка от воздействия атмосферы при нагреве обеспечивали применением эмали или стекловолокнистой ленты, после рас-

Рис. 3. Стык труб с косостыковыми разделками, собранный под пайку

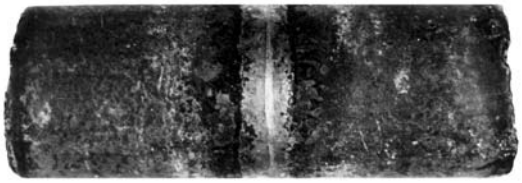


Рис. 4. Состояние наружной поверхности стыка после пайки

плавления материала которой образовалось вязкое защитное покрытие, удаляющее с поверхности труб оксиды и надежно изолирующее паяемый стык от окисления.

В процессе охлаждения покрытие самоудаляется со стыка, обеспечивая визуальный контроль за качеством галтели. Блестящая поверхность стыка в области галтели служит одним из признаков высокого качества паяного соединения (рис. 4).

При индукционной пайке крупных соединений труб по сечению стыка труб могут возникать значительные перепады температур, при которых плавление припоя сначала может возникнуть на отдельных участках стыка до сближения разделок, что приведет к его вытеканию из зазора. Поэтому, если при капиллярной пайке рекомендуется применять припои с минимальным температурным интервалом плавления, то при некапиллярной пайке необходимо использовать припои с максимально широким температурным интервалом плавления, при котором сохраняется высокая вязкость расплава припоя в широком температурном интервале. Расплавы таких припоев (многокомпонентных) сохраняют высокую вязкость и после полного расплавления, что обеспечивает удержание расплава в широком паяльном зазоре (0,5 мм). Температура некапиллярной пайки должна находиться в пределах сохранения высокой вязкости расплава припоя. Температурный интервал плавления припоя П-87 равен 70 °С. В практике индукционной пайки труб фактов вытекания припоя из зазора (до 0,5 мм) не наблюдалось.

Приведенные результаты разработок по некапиллярной пайке показывают ее принципиальное отличие от процесса капиллярной пайки по теории формирования паяного шва и техническим возможностям создания крупных паяных соединений с практически неограниченной шириной и глубиной паяльного зазора, что обеспечивает некапиллярной пайке высокую конкурентоспособность по сравнению с капиллярной пайкой и сваркой.

Однако успешное развитие и внедрение в практику этого уникального способа создания монолитных металлических соединений требует систематизации, анализа уже достигнутых результатов и создания основ теории некапиллярной пайки, изучающей комплекс процессов, действующих при формировании паяного соединения.

Выводы

Некапиллярная пайка расширяет возможности современного производства крупных металлоконструкций: обеспечивает изготовление качественных соединений, получить которые другими способами невозможно, и успешно заменяет традиционные способы соединения – сварку и резьбу.

В процессе разработки некапиллярной пайки открываются новые процессы (перемешивание, автовакуумный эффект) в паяльном зазоре. Электромагнитное поле индуктора оказывает силовое воздействие на расплав припоя в широком зазоре, приводя его к перемешиванию, в результате которого он предельно насыщается паяемым металлом.

При пайке соединений труб с зажатым между разделками припоем толщина расплавленной прослойки припоя устанавливается на уровне 0,4...0,5 мм.

Успешная пайка крупных обечаек и промышленных трубопроводных систем в полевых условиях показала, что для процесса пайки больше не существует каких-либо ограничений (по стерильности, по размерам изделий, по паяльным зазорам), сложившихся в течение многовекового периода ее развития; требования к ее проведению практически соответствуют требованиям к ручной сварке при сохранении значительных преимуществ по технологичности и свойствам паяных соединений.

Пайка становится полноценным промышленным способом соединения, способным решать сложные технические задачи в области строительства, выдвигаемые современным научно-техническим прогрессом.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пайка** с принудительным формированием шва при некапиллярных зазорах / И.Е. Петрунин и др. // Сварочное производство. 1983. № 8.

2. **Особенности** формирования паяного шва в больших зазорах с наполнителем при пайке стали в вакууме / В.Н. Радзиевский, Л.В. Баранова // Сварочное производство. 1989. № 11.

3. **Исследование** угловых температурных деформаций концов труб при индукционной пайке стыков трубопроводов / В.И. Хоменко и др. // Сварочное производство. 1988. № 12.

4. **Причины** отслоения железомарганцевого припоя при индукционной пайке углеродистых и низколегированных сталей / М.Х. Шоршоров и др. // Сварочное производство. 1987. № 7.

5. **Технология** индукционной пайки промысловых трубопроводов / В.В. Карабанов // Технология металлов. 1999. № 12.

Виктор Владимирович Карабанов, канд. техн. наук

ООО «Завод «Амурлитмаш»

Адрес: 681008, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Культурная, д. 1
Отдел маркетинга (4217) 55-66-42. Отдел сбыта (4217) 55-60-77. Факс: (4217) 55-60-76
E-mail: alm@mail.kna.ru. Http:\\www.amurlitmash.ru

Создание дробеметного оборудования

(на правах рекламы)

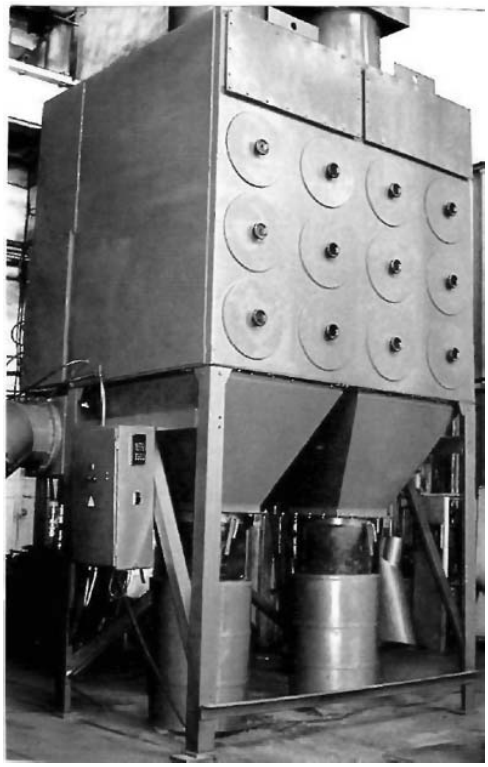
Заводу "Амурлитмаш" исполнилось 65 лет. Начиная свою деятельность как оборонное машиностроительное предприятие, завод уже более полувека специализируется на создании дробеметного и дробеструйного оборудования для финишной обработки отливок, поковок, штамповок, подготовке поверхности металлоизделий перед нанесением антикоррозионных покрытий, создании дробеметных установок для наклепа.

Предприятие занимается анализом международных тенденций развития дробеметной техники, ее исследованием, разработкой под потребности рынка.

Специалисты конструкторской службы изучали мировые достижения и перспективу их развития в США, странах Западной Европы, Японии и других азиатских странах.

Являясь лидером российского рынка и стран СНГ, "Амурлитмаш" также поставляет свою продукцию в страны дальнего зарубежья: Англию, Германию, Бельгию, Францию, Мексику, Китай, Японию, всего более чем в 30 стран мира.

Технические решения, используемые в разработках, обычно являются передовыми достижениями на текущий момент, например, электромагнитный затвор для подачи дроби в системе дробеобращения машин.



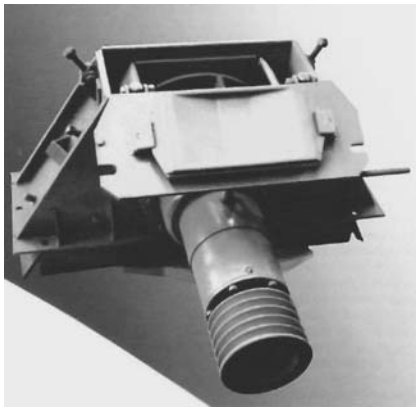
Если российским потребителям предлагается импортное оборудование, не производимое в России, то "Амурлитмаш" в сжатые сроки осваивает импортозамещение, во многих случаях более совершенное или более дешевое, чем предложенное на рынке. Примером является установка дробеструйной очистки пассажирских вагонов от старой краски, воздушные картриджные фильтры промышленной очистки воздуха.

Конец прошлого века и начало нынешнего характеризуются новым техническим подходом Заказчика к заказу оборудования. Все чаще приходится выпускать оборудование под заказ по индивидуальным проектам. К настоящему моменту реализованы следующие проекты:

– дробеметная установка для очистки насосных штанг с разгрузочным устройством;

дробеметная установка для наклепа железнодорожных рессор;

– дробеметная установка для очистки бандажей железнодорожных колес;



– дробеметная установка для очистки труб определенного диаметра;

– дробеструйная установка для очистки металлоконструкций определенных размеров.

С развитием конкуренции на российском рынке со стороны иностранных производителей дробеметного оборудования приходится работать над техническим совершенствованием освоенного ранее оборудования. Поэтому все больше в машинах "Амурлитмаша" используют комплектующие изделия ведущих мировых производителей. В конструкции производимого оборудования заменены редукторы и мотор-редукторы на лучшие образцы фирм-производителей Западной Европы. В системы электрооборудования внедряют аппаратуру компании "Сименс".

Однако заменой только комплектующих, даже на самые совершенные, полностью проблему качества не решить. Приходится заниматься также техническими проблемами повышения износостойкости деталей собственного производства. Актуальной проблемой для любого производителя дробеметного оборудования сейчас остается достижение повышенной стойкости главной детали дробеметного аппарата – лопасти.

Бельгийская компания "Рутен" выпускает на сегодня самые износостойкие лопасти в мире, что обеспечивается их специальной формой и материалом. ООО "Завод "Амурлитмаш" имеет патент на изобретение на форму лопасти, более эффективную, чем бельгийская. В настоящее время специалисты предприятия занимаются поиском подходящего материала для производства лопастей.

Иногда чисто технические проблемы перерастают в экономические. Например, затраты для организации собственного производства необходимого материала настолько повышают себестоимость производства машины, что цена становится неконкурентоспособной. Поэтому предприятие взяло направление на кооперацию со специализированными производителями необходимой продукции с низкой себестоимостью, которые находятся на небольшом удалении от производства "Амурлитмаш". К ним, в первую очередь, относятся высокотехнологичные промышленные предприятия Китая.

Вопросы технического перевооружения являются актуальными не только для "Амурлитмаша", но и для большинства машиностроительных заводов России. Решить эту проблему, не имея достаточно финансовых средств, не используя глубокую кооперацию с высокотехнологичными производствами, практически невозможно.

Используя собственный интеллектуальный потенциал конструкторско-технологической службы, подпитывая его информацией о лучших мировых достижениях и перспективах развития, целенаправленно развивая кооперацию с российскими и зарубежными высокотехнологичными производствами ООО "Завод "Амурлитмаш" надеется в дальнейшем упрочить позиции лидерства в сфере производства дробеметного оборудования.

621.77.016.2:621.762.4

В.А. Дёмин, Н.А. Шестаков, В.Н. Субич
(Московский государственный индустриальный университет)

Осадка заготовок в оболочках

Рассмотрено применение компьютерного моделирования для анализа течения металла в процессах осадки заготовок в оболочках. Приведены данные о влиянии толщины стенки оболочки на напряженно-деформированное состояние заготовки. Предложена новая схема осадки малопластичных материалов в оболочках для снижения технологической силы и работы деформации.

The article considers the applying of computer simulation for the analysis of metal flow in processes of an upsetting of bars in envelopes. The data about influencing wall thickness of an envelope on the bar's stress-deformed condition is presented. The new project of upsetting of low-plastic materials in envelopes allowing to decrease the force and the power of deformation is offered.

Известные результаты исследований дают основание полагать, что решение проблем, связанных с формированием гомогенной структуры, устранением дефектов макро- и микроструктуры, ухудшающих эксплуатационные свойства изделий из проката и слитков, а также устранением пористости, залечиваемостью дефектного строения заготовок из порошковых материалов, достигается обработкой давлением при определенном сочетании основных влияющих факторов, определяющих термомеханические условия деформации: температуры, напряжений всестороннего сжатия, степени и скорости деформации [1].

При изготовлении деталей и заготовок из сложнолегированных сплавов, которые, как правило, являются малопластичными и труднодеформируемыми, возможности формирования требуемых свойств обработкой давлением ограничены допустимой степенью деформации, в пределах которой не происходит разрушение деформируемой заготовки.

Температура и скорость деформации имеют узкий диапазон допустимых значений, поэтому в качестве главного управляющего параметра формирования свойств материалов в процессах обработки давлением следует рассматривать степень деформации

$$\varepsilon_0 = \int \dot{\varepsilon}_и \, dt,$$

где $\dot{\varepsilon}_и = \sqrt{2/3}\sqrt{\xi_{ij}\xi_{ij}}$ – интенсивность скоростей деформации; ξ_{ij} – компоненты тензора скоростей деформации.

Допустимая степень деформации зависит от схемы напряженного состояния. Схема напряженного состояния численно характеризуется коэффициентом жесткости

$$\eta = 3\sigma/\sigma_и,$$

где σ и $\sigma_и$ – среднее напряжение и интенсивность напряжений соответственно.

Анализ современных способов обработки малопластичных материалов позволяет выделить класс эффективных технологических процессов их деформации в оболочках (рис. 1). В рамках этого класса процессов имеются широкие возможности управления схемой напряженного состояния. Увеличение технологической пластичности может быть достигнуто при мягких ($\eta << 0$) схемах напряженного состояния. Допустимые степени деформации возрастают с уменьшением параметра η, но при этом возникают ограничения процесса деформации по необходимой технологической силе, энергетическим затратам, а также стойкости штампов.

Таким образом, рациональная схема напряженного состояния определяется возможностью достижения необходимой технологической пластичности, с одной стороны, и наименьшими энергосиловыми затратами – с другой. С этих позиций было проведено

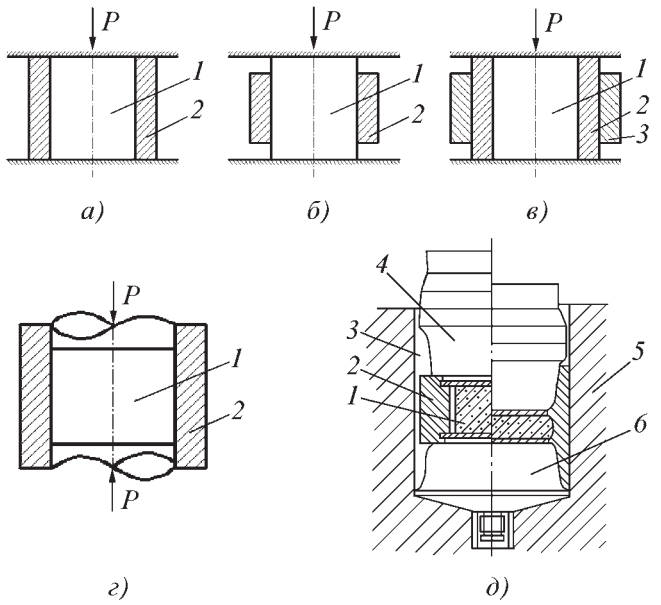


Рис. 1. Схемы осадки малопластичных материалов в оболочках [2]:
а – в оболочках цилиндрической формы; *б* – в коротких оболочках; *в* – в комбинированных оболочках; *г* – осадка без обжатия оболочки; *д* – осадка с истечением оболочки. На схемах *а*, *б*, *в*, *е*: *1* – заготовка; *2* и *3* – элементы оболочки; на схеме *д*: *1* – заготовка; *2* – оболочка; *3* – полость для истечения оболочки; *4* – верхний пуансон; *5* – контейнер; *6* – нижний пуансон

исследование технологических схем деформирования малопластичных материалов, приведенных на рис. 1.

Исследования проводили с применением программного комплекса для конечно-элементного моделирования двумерных задач пластического течения несжимаемых и пористых материалов, а также многокомпонентных заготовок, состоящих из слоев материалов с различными реологическими свойствами [3]. В основу алгоритма положены общие уравнения теории пластического течения жестковязкопластического упрочняющегося материала для осесимметричной и плоской деформации.

На первом этапе исследований сопоставляли экспериментальные данные для схемы на рис. 1, *а* с результатами моделирования. Моделирование процесса деформации по схеме на рис. 1, *а* проводили с использованием исходных данных, принятых при проведении экспериментов. Материал заготовки и оболочки – дюралюминий Д16; диаметр заготовки 50 мм; толщина стенки оболочки 6 мм; высота 125 мм; температура заготовки и осадочных плит 400 °С; смазка – нет; теплопроводность 130 Вт/(м·К); удельная теплоемкость 922 Дж/(кг·К); коэффициент трения 0,4.

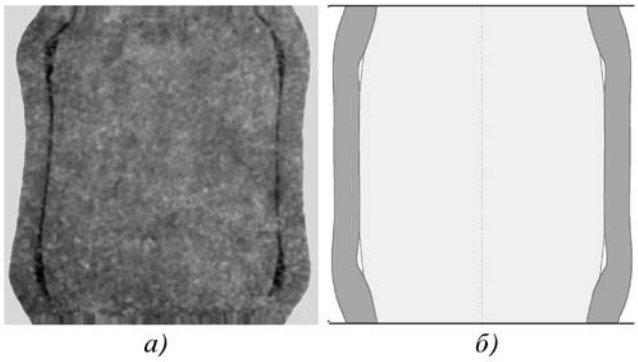


Рис. 2. Образец после осадки в тонкостенной оболочке на 30 % (*а*) и результат моделирования (*б*)

Кривая упрочнения сплава Д16 согласно экспериментальным данным [4] аппроксимирована выражением:

$$\sigma_s(\varepsilon_0, \dot{\varepsilon}_и, T) = 744{,}865\varepsilon_0^{0{,}113}\dot{\varepsilon}_и^{0{,}022}e^{-0{,}00438T}, \qquad (1)$$

где σ_s – напряжение текучести, МПа; e – основание натуральных логарифмов; T – температура, °С.

На рис. 2 представлен образец после осадки на 30 %, а также результаты моделирования описанного процесса. Погрешность описания контура границы между заготовкой и оболочкой и контура наружной поверхности оболочки, полученных в результате моделирования, составила не более 9,5 %.

Из рис. 2 следует, что в процессе деформации пакета с принятыми соотношениями размеров заготовки и оболочки происходит образование кольцевых полостей между ними, что приводит к отсутствию бокового давления в этих зонах и перемещению опасной зоны очага деформации с экватора боковой поверхности осаживаемой заготовки в области кольцевых полостей. Образование кольцевых полостей происходит вследствие продольной потери устойчивости оболочки. Оболочки, для которых характерна потеря устойчивости, далее будем называть тонкостенными.

Результаты сопоставления экспериментальных и расчетных данных, полученные для процесса осадки заготовок в тонкостенных оболочках, дают основание сделать следующие выводы. Программный комплекс позволяет:

– с достаточной точностью описать кинематику течения двухслойных пакетов, состоящих из заготовки и оболочки;

– определять расчетным путем условия возможной потери устойчивости оболочек и тем самым выделить оболочки тонкостенного типа, использование которых для улучшения схемы напряженного состояния неэффективно.

Дальнейшее выявление закономерностей влияния толщины оболочки на схему напряженного состояния заготовки осуществляли только путем компьютерного моделирования. Расчет напряженно-деформированного состояния заготовок в оболочках различной тол-

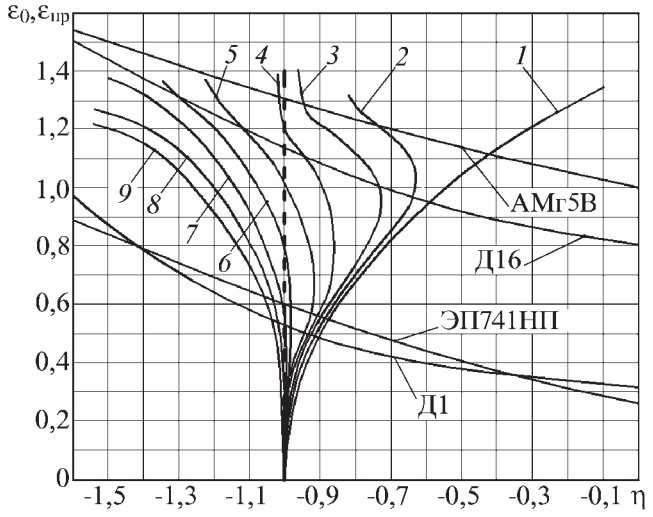


Рис. 3. Диаграммы пластичности и пути деформирования в опасной зоне заготовки с соотношением H/D = 2,5 при деформации в оболочках с различной толщиной стенки S:
1 – без оболочки; *2* – 6 мм; *3* – 8 мм; *4* – 10 мм; *5* – 12 мм; *6* – 14 мм; *7* – 16 мм; *8* – 18 мм; *9* – 20 мм (H, D – высота и диаметр заготовки соответственно)

щины по схеме на рис. 1, *а* проводили с использованием вышеперечисленных исходных данных. Результаты расчета приведены на рис. 3 в виде зависимостей $\varepsilon_0 = \varepsilon_0(\eta)$ (путей деформирования в опасной зоне – в области экватора боковой поверхности) на плоскости диаграмм пластичности $\varepsilon_{пр} = \varepsilon_{пр}(\eta)$ ($\varepsilon_{пр}$ – предельная деформация) различных материалов – Д1, ЭП741НП, Д16, АМг5В. Путь деформирования *1* соответствует свободной осадке.

Среди кривых $\varepsilon_0 = \varepsilon_0(\eta)$, приведенных на рис. 3, можно выделить кривые *2–5*, соответствующие толщинам оболочки, равным 6, 8, 10 и 12 мм. Путь деформирования в опасной зоне при деформации с применением указанных оболочек до значительных степеней деформации (в диапазоне от нуля до ε_0 = 0,9...0,5) совпадает (или практически совпадает) с кривой *1*, что указывает на отсутствие влияния оболочки на схему напряженного состояния в этом диапазоне деформаций. После достижения верхней границы указанного диапазона происходит некоторое улучшение схемы напряженного состояния (т.е. путь деформирования начинает смещаться в сторону мягких схем) благодаря увеличению толщины стенки оболочки.

Другие выводы могут быть сделаны по результатам анализа характера кривых *6–9*, соответствующих оболочкам с толщиной стенки 14, 16, 18 и 20 мм. В этом случае деформация развивается на фоне непрерывного улучшения схемы напряженного состояния, причем скорость улучшения возрастает с увеличением толщины стенки оболочки.

Результаты расчета иллюстрируют эффективный подход к проектированию конструкций пакетов для деформации малопластичных материалов на основе компьютерного моделирования течения двухслойных заготовок. Для других малопластичных материалов, оболочек из других марок материалов и условий трения на контактных поверхностях установленные конкретные значения степеней деформации и соотношения размеров оболочек, соответствующие моменту потери устойчивости оболочек, а также размеры оболочек, приводящие к эффективному улучшению схемы напряженного состояния в деформируемой заготовке, будут другими.

Однако методика выбора размеров оболочки из заданного материала должна включать в себя этапы вышеприведенного анализа. Компьютерное моделирование позволяет в значительной мере, а иногда и полностью, исключить технологические пробы и сократить затраты на проектирование технологических процессов деформации малопластичных материалов осадкой в оболочках цилиндрической формы.

Приведенные результаты исследований дают основание сделать еще один важный вывод. Улучшение схемы напряженного состояния при осадке в оболочках цилиндрической формы достигается путем увеличения толщины стенки, но это не связано с повышением несущей способности оболочки.

На рис. 3 штриховой линией показан путь деформирования частиц материала осаживаемой заготовки при отсутствии трения, который не зависит от толщины оболочки, т.е. при использовании оболочек любой толщины и отсутствии сил трения путь деформирования представляет собой прямую $\eta = -1$. Это подчеркивает тот факт, что боковое давление на заготовку определяется свойствами материала оболочки только в той степени, в которой силы трения зависят от указанных свойств.

Увеличение толщины стенки оболочки приводит к увеличению площади контактной поверхности, а через нее – к увеличению сил трения и в конечном итоге к повышению бокового давления. Таким образом, достижение необходимых схем напряженного состояния связано с уменьшением коэффициента полезного действия процесса деформации и, вследствие этого, с повышенными энергетическими затратами. Это приводит иногда (особенно в случае необходимости изготовления крупных поковок из малопластичных материалов) к непреодолимым препятствиям из-за отсутствия оборудования с необходимой технологической силой.

Улучшение схемы напряженного состояния благодаря увеличению несущей способности оболочки достигается применением процесса осадки заготовок в коротких и комбинированных оболочках (см. рис. 1, *б*, *в*). В этом случае уменьшаются непроизводительные затраты энергии на преодоление сил трения, а напряжения, определяющие боковое давление на заготовку, зависят только от способности наружной оболочки выдерживать внутреннее давление.

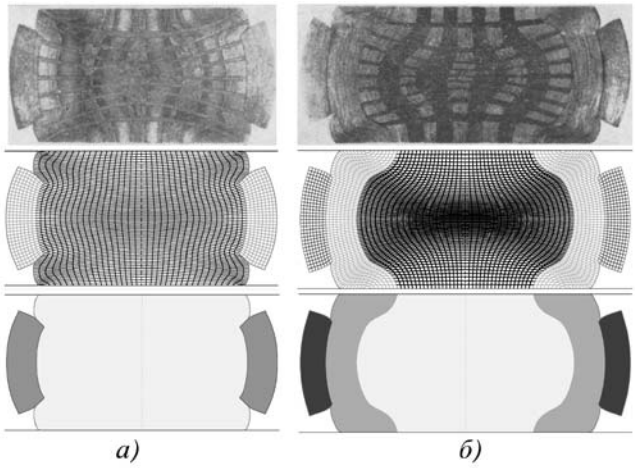


Рис. 4. Результаты моделирования осадки в коротких (*а*) и комбинированных (*б*) оболочках

На рис. 4 приведены результаты физического и конечно-элементного моделирования, из которых следует, что к числу недостатков применения таких схем можно отнести значительное искажение контура поверхности, разделяющей заготовку и оболочку, что затрудняет удаление оболочки и снижает коэффициент использования материала.

Приведенные результаты исследования позволяют дать рекомендации общего характера для выбора схемы деформирования. Схемы на рис. 1, *а*, *б*, *в*, *е* предпочтительны при единичном и мелкосерийном производстве поковок. В этом случае не требуется изготовление специальной технологической оснастки, сравнительно невелика требуемая для осуществления процесса технологическая сила. Однако применение схемы, представленной на рис. 1, *а*, ограничивается невысокими возможностями управления параметром η в области мягких схем, что приводит к ограничениям по степени деформации и уплотнению заготовок.

Схема, приведенная на рис. 1, *б*, обеспечивает более высокое боковое давление на экваторе боковой поверхности, но боковая поверхность, не охваченная оболочкой, является опасной с позиции разрушения зоной и тем самым приводит также к ограничениям по степени деформации.

Применение комбинированных оболочек (см. рис. 1, *в*) позволяет увеличить диапазон допустимых степеней деформаций, но при этом усложняется конструкция деформируемого пакета и значительно увеличивается расход материала оболочки.

Применение схемы на рис. 1, *е* осложняется необходимостью использования в процессе осадки пуансонов различного диаметра. Это значительно снижает производительность работы и в некоторых случаях требует дополнительного промежуточного подогрева деформируемого пакета.

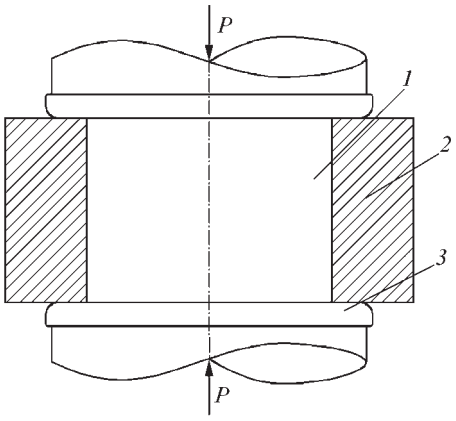


Рис. 5. Схема осадки с частичным обжатием оболочки:
1 – заготовка; *2* – оболочка; *3* – пуансон

Схема, приведенная на рис. 1, *д*, значительно расширяет возможности управления параметром η (до η = –3) и более мягких схем напряженного состояния. При таких значениях параметра η, как правило, предельно допустимые степени деформации соответствуют необходимым для создания требуемой структуры и плотности, однако применение таких схем связано со значительными затратами на специальную технологическую оснастку и требует мощного технологического оборудования.

Проведенное исследование позволило усовершенствовать процесс осадки в оболочках и предложить новую схему деформирования (рис. 5). Ее отличительной особенностью является то, что процесс деформации начинается по схеме, приведенной на рис. 1, *а*, а заключительная стадия протекает при частичном обжатии оболочки. Это достигается соответствующим выбором диаметра осадочной плиты. Диаметр плиты может лежать в пределах $d \le d_б \le D_п$ (d – диаметр заготовки после осадки; $d_б$ – диаметр осадочной плиты (бойка); $D_п$ – диаметр пакета после осадки).

Выбор диаметра осадочных плит в указанном интервале позволяет управлять параметром η в процессе деформации и создавать схемы напряженного состояния, обеспечивающие достижение необходимой для формирования свойств степени деформации в допустимых пределах по запасу пластичности и наименьшей технологической силе.

Схема деформирования с частичным обжатием оболочки сочетает преимущества схем деформирования, приведенных на рис. 1, *а* и *г*. В сравнении со схемой на рис. 1, *а* может быть достигнуто значительное снижение технологической силы, а в сравнении со схемой на рис. 1, *г* исключается необходимость замены осадочных плит на плиты большего диаметра при осадке более чем на 30 % и промежуточного подогрева.

Выводы

1. Проведено сопоставление результатов компьютерного моделирования кинематики течения металла при осадке цилиндрических заготовок в оболочках с экспериментальными данными. Адекватность моделирования подтверждена сопоставлением расчетной и конечной формы изделия. Приведены данные о влиянии толщины стенки оболочки на напряженно-деформированное состояние заготовки.

2. Предложено направление совершенствования процесса осадки малопластичных материалов в оболочках в целях снижения технологической силы и работы деформации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Шестаков Н.А., Субич В.Н., Жуков Д.О.** Обобщенная модель внутренних взаимодействий в металлах при пластической деформации // Изв. ТулГУ. Сер. "Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением". Тула: Изд-во ТулГУ, 2005. Вып. 1. С. 22–29.

2. **Могучий Л.Н.** Обработка давлением труднодеформируемых материалов. М.: Машиностроение, 1976. 272 с.

3. **Программный** комплекс для моделирования двумерных процессов пластического течения при обработке металлов давлением: свидетельство об отраслевой регистрации разработки / А.В. Власов, Н.А. Шестаков, В.Н. Субич, В.А. Дёмин / М-во образования РФ, ОФАП. Номер гос. рег. 50200400053.

4. **Сопротивление** пластической деформации металлов и сплавов: справочник / П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1983. 352 с.

Виктор Алексеевич Дёмин, д-р техн. наук;
Николай Александрович Шестаков, д-р техн. наук
Вадим Николаевич Субич, д-р техн. наук

УДК 621.735

В.Б. Мамаев *(Рыбинская государственная авиационная технологическая академия им. П.А. Соловьева)*

Влияние формы осесимметричных штампуемых заготовок на материало- и энергозатраты при штамповке в открытых штампах

На основе исследования особенностей формы четырех типов заготовок для штамповки в открытых штампах приведены рекомендации, направленные на снижение материало- и энергопотребления.

The investigation of the peculiarities of four types of the blanks for an open-stamp forging made possible to decrease the material and energy consumption of the process.

Опыт мирового промышленного развития показывает, что проблема широкого применения энерго- и материалосберегающих технологий была, есть и останется актуальной на длительную перспективу. Широко используемая в заготовительном производстве штамповка заготовок в открытых штампах обладает весьма существенными резервами в плане энерго- и материалосбережения. Исследования показывают, что форма, размеры, качество центрирования заготовок, применяемых при объемной штамповке, оказывают существенное влияние на заполнение полости штампа, металло- и энергозатраты.

Поэтому одним из направлений, повышающих эффективность получения штампованных заготовок в открытых штампах, является рациональное назначение избытка объема заготовок под штамповку, получение требуемых размеров заготовки после предварительной осадки в целях обеспечения ее последующего центрирования в штамповочном ручье, а также выбор оптимальных параметров облоя.

В работе [1] приведено теоретическое обоснование и методика расчета контура свободной поверхности в процессах осадки и выбора исходных размеров цилиндрической заготовки для получения требуемого контура, рассмотрены вопросы обеспечения самоцентрирования осаженных заготовок в штамповочных ручьях для получения поковок простой формы типа *I* (рис. 1).

Однако с практической точки зрения гораздо больший интерес и потребность в рекомендациях представляют методики расчетов и проектирования для более сложных поковок с учетом их индивидуальных особенностей. Поэтому далее на конкретных примерах рассмотрим использование результатов, полученных ранее, еще для трех типов поковок, а для

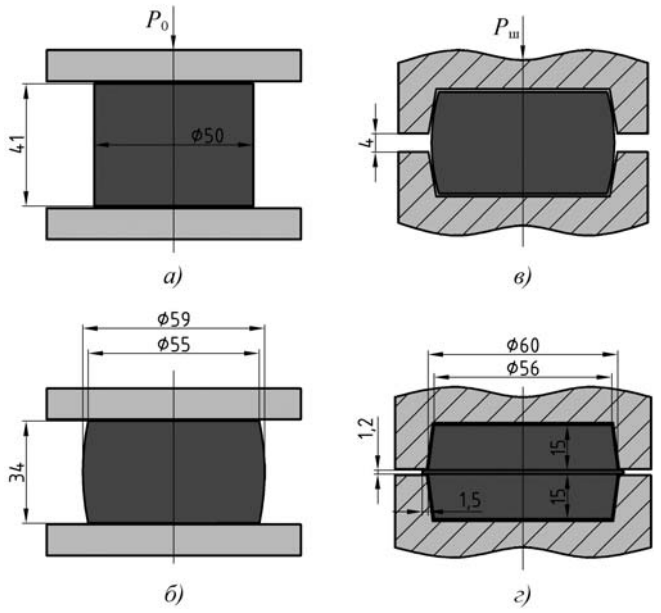


Рис. 1. Стадии изготовления поковки типа *I*:
а – исходная цилиндрическая заготовка, $V_з \le 1{,}05V_{тпр}$; *б* – заготовка после предварительной осадки, δ = 17 %; *в* – самоцентрирование осаженной заготовки в штамповочном ручье; *г* – заготовка после доштамповки

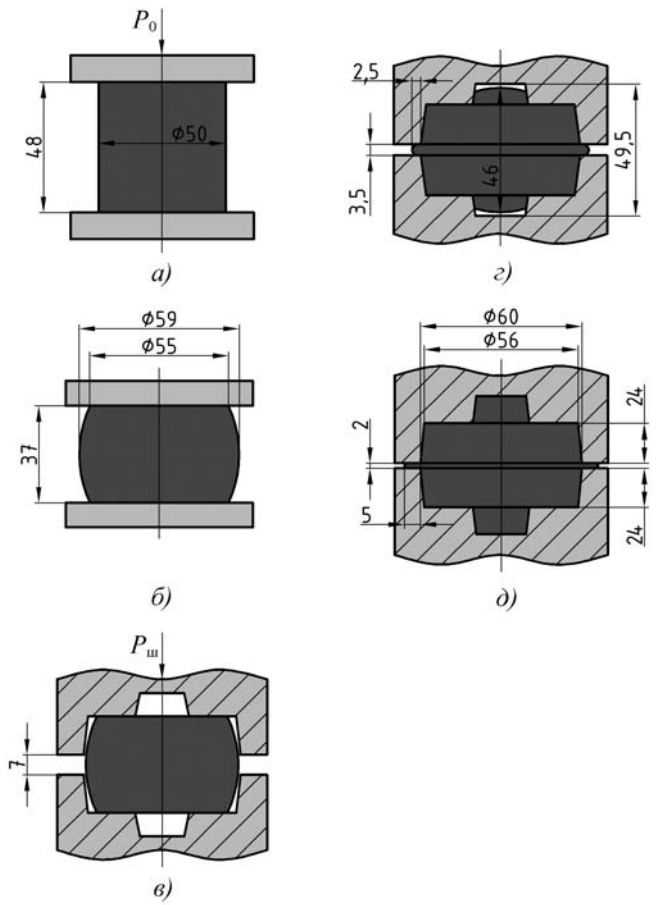


Рис. 2. Стадии изготовления поковки типа *II*:
а – исходная цилиндрическая заготовка, $V_з$ = = $(1{,}05...1{,}1)V_{тпр}$; *б* – заготовка после предварительной осадки, δ = 23 %; *в* – самоцентрирование осаженной заготовки в штамповочном ручье; *г* – неполное заполнение гравюры штампа и начало образования облоя; *д* – заготовка после доштамповки

сравнения в качестве отправной точки примем поковку простой формы первого типа.

К типу *II* отнесем поковку, изображенную на рис. 2, т.е. с выступом в центральной части по оси симметрии, а к типу *III* – поковку с кольцевым диаметральным выступом, расположенным по ее краю, как показано на рис. 3. На рис. 4 приведена поковка типа *IV*, которая одновременно обладает признаками поковок типов *II* и *III*, т.е. имеет выступы в центральной части и по краям.

Для получения поковки типа *I* при выполнении условий ее самоцентрирования, изложенных в работе [1], избыток объема материала исходной цилиндрической заготовки не требуется. Однако на практике с учетом предпочтительной простановки размеров в системе отверстия и величины минусового поля допуска, а в конечном счете точности изготовления заготовки, происходит некоторое колебание объема заготовки, и при расчете этого объема по номинальным размерам требуемая поковка, как правило, не получается. Кроме того, несмотря на использование в большинстве расчетов принципа равенства объемов заготовки и поковки, при обработке металлов давлением происходит уплотнение металла приблизительно на 2 %. Поэтому некоторый избыток объема заготовки все же необходим, но назначать его более 5 % в этом случае нецелесообразно.

Для получения поковки второго типа также предполагается предварительная осадка исходной цилиндрической заготовки (рис. 4, *а*) и обеспечение размеров (рис. 4, *б*), необходимых для самоцентрирования (рис. 4, *в*). Заполнение полостей, необходимых для формирования бобышек при отношении их высоты к диаметру до 0,5, происходит довольно интенсивно (рис. 4, *г*), но окончательно, как по высоте, так и в углах, осуществляется лишь на стадии доштамповки. При этом минимальный необходимый объем исходной цилиндрической заготовки $V_з$ должен превышать расчетный объем тела поковки $V_{тпр}$ (т.е. без учета обрезаемого в дальнейшем облоя) уже на 5...10 %.

Если относительная высота бобышек лежит в пределах 0,5...1, то нужно использовать другое, более сложное технологическое решение, которое, как правило, сводится к введению дополнительного перехода штамповки. А если относительная высота еще больше, то такая поковка может быть отнесена к нетехнологичной при изготовлении ее в открытых штампах на КГШП, и более рационально будет использование другого оборудования и способа пластической деформации.

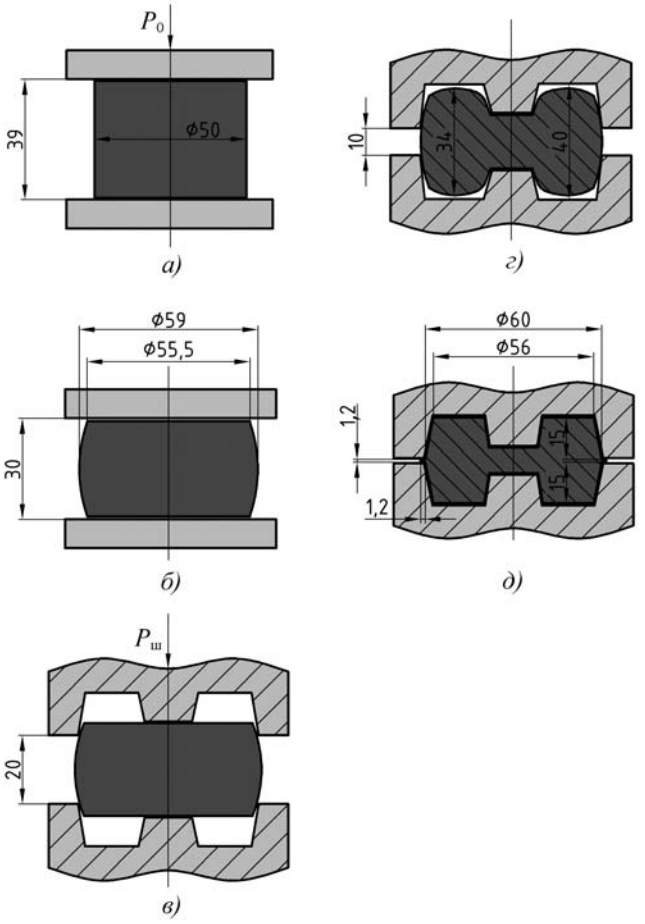


Рис. 3. Стадии изготовления поковки типа *III*:
а – исходная цилиндрическая заготовка, $V_з$ = = (1,05...1,1)$V_{тпр}$; *б* – заготовка после предварительной осадки, δ = 23 %; *в* – самоцентрирование осаженной заготовки в штамповочном ручье; *г* – заполнение гравюры штампа; *д* – заготовка после доштамповки

Поковка типа *III*, показанная на рис. 3, *д*, при той же абсолютной и относительной высоте выступов может быть получена по такой же схеме и с тем же избытком металла исходной цилиндрической заготовки, что и поковка типа *II*. При этом угол выступа, имеющий меньший радиус, заполняется в последнюю очередь.

Для изготовления поковки типа *IV* существует возможность центрирования как минимум по двум вариантам. Первый заключается в использовании, так же как для типов *I*–*III*, предварительной осадки (см. рис. 4, *б*), а второй предполагает получение кольцевой наметки (см. рис. 4, *в*), которая в свою очередь также требует качественного центрирования.

Исследования, проведенные в данной работе, не дают рекомендаций для принятия инженерных решений обеспечения центрирования при наметке как по причине невозможности учесть все многообразие конфигураций, а также отсутствие конкретных данных об абсолютных и относительных размерах, так и по причине того, что при исследовании ставилась другая цель – дать ответ на вопрос о целесообразности и эффективности использования центрирования по кольцевой наметке, а также сравнение результатов такого решения с первым вариантом (рис. 4, *б*). Однако при малых размерах торцевой поверхности исходной заготовки может возникнуть необходимость последовательного использования вариантов, изображенных на рис. 4, *б* и *в*.

На рис. 4, *г* показано, что центрирование может быть обеспечено как отдельно по первому варианту, так и по второму, а в идеальном случае – одновременно по двум поверхностям. Заполнение центральных и диаметральных выступов (см. рис. 4, *д*) происходит примерно одинаково, т.е. не зависит от варианта центрирования, так же как у поковок типов *II* и *III*. Тем не менее требуемый избыток материала исходной заго-

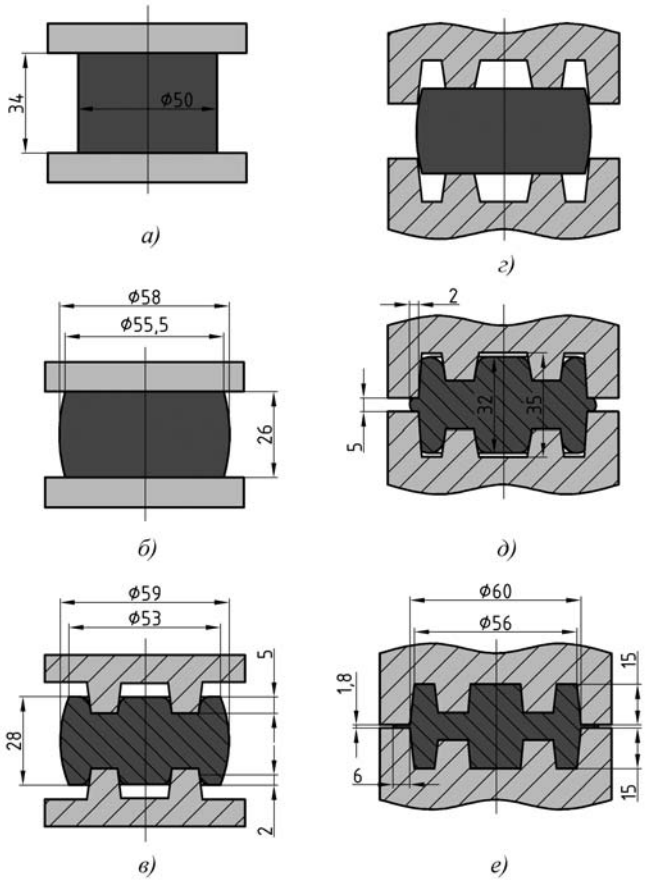


Рис. 4. Стадии изготовления поковки типа *IV*:
а – исходная цилиндрическая заготовка, $V_з$ = 1,05$V_{тпр}$; *б* – заготовка после предварительной осадки самоцентрированная по образующей, δ = 26 %; *в* – обеспеченное центрирование с помощью наметки; *г* – центрование заготовки по образующей контура свободной поверхности или с помощью наметки; *д* – неполное заполнение гравюры и начало образования облоя; *е* – заготовка после доштамповки

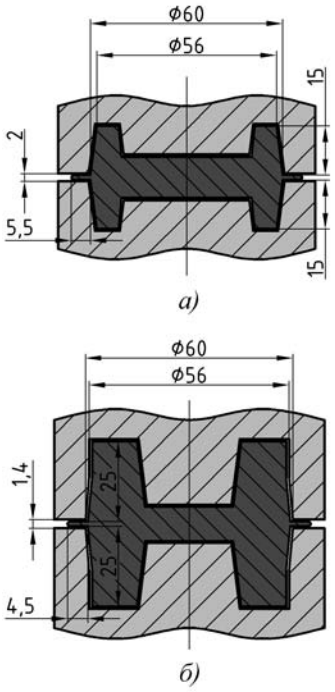


Рис. 5. Поковки типа *III* с высокими диаметральными выступами:
а – относительно низкая поковка, $V_з = 1{,}15V_{тпр}$; *б* – относительно высокая поковка, $V_з = 1{,}1V_{тпр}$

товки составляет около 10 %, т.е. на верхнем пределе, необходимом для поковок второго и третьего типов.

Это можно объяснить тем, что в последнем случае диаметральный кольцевой выступ имеет меньшую ширину и, следовательно, более высокую относительную высоту, равную 2, в отличие от поковки типа *III*.

На рис. 5 приведены две поковки, относящиеся к третьему типу, также имеющие выступы, как и поковка типа *IV*, с относительной высотой, равной 2. Поковка, изображенная на рис. 5, *а*, в отличие от базового варианта (см. рис. 3), с одной стороны, имеет более развитую центральную часть (другими словами, больший диаметр или "полотно" при одинаковой толщине), а с другой – она может быть условно определена как относительно низкая, что подтвердили эксперименты: для ее успешного формирования потребовался избыток металла заготовки, равный 15 %, в то время как для поковки, изображенной на рис. 5, *б*, которую можно отнести к относительно высокой, достаточно было только 10 %, т.е. максимума в базовом варианте, изображенном на рис. 3.

Таким образом, подводя промежуточные итоги, можно констатировать, что на основе исследований, выполненных в работе [1], возможно рассчитывать и назначать оптимальные размеры исходной цилиндрической заготовки, необходимую величину относительной деформации при предварительной осадке в целях последующего обеспечения качественного центрирования заготовки в штамповом ручье и заполнения полости последнего при минимизации потерь металла в облой.

На основе обработки информации по большому количеству различных поковок в литературе приведены данные, что среднестатистическая величина избытка материала исходной заготовки составляет 8...12 %, и если разработанный или используемый технологический процесс вписывается в эти границы, то его можно считать рациональным.

Результаты исследований и рекомендации по назначению избытка объема исходной цилиндрической заготовки, которые приведены в данной работе, не противоречат указанному выше и, кроме того, позволяют далее минимизировать потери металла в облой за счет более индивидуального подхода, т.е. отнесения анализируемой поковки в той или иной мере к одному из типов (*I*–*IV*).

Далее представляется возможным проанализировать влияние величины избытка объема заготовки на требующиеся энергосиловые параметры процесса штамповки в открытых штампах. С этой целью проводили записи диаграмм $P = f(\Delta h)$, которые оказались сходными по характеру. Поэтому ниже в качестве примера рассмотрены результаты (рис. 6), полученные для поковки типа *II*.

В данном случае на основе графиков на рис. 6, *а* можно проанализировать вопрос о целесообразности использования осадки в качестве предшествующей операции штамповки или ее переходов, а также влияния избытка объема заготовки с точки зрения энергосиловых параметров (рис. 6, *б*).

На рис. 6, *а* приведены две кривые: *1* – когда при требуемом избытке объема заготовки, равном 10 %, поковку при тщательном центрировании цилиндрической заготовки (что трудно обеспечить в производственных условиях) штамповали без предварительной осадки; *2* – когда при прочих одинаковых условиях заготовку предварительно осаживали по рекомендациям, приведенным в работе [1].

Точка пересечения кривых *1* и *2* в пределах погрешности эксперимента совпадает с точкой на кривой *2* на рис. 6, *б*, являющейся границей между процессами предварительной осадки и штамповки. Для кривой *1* до точки пересечения с кривой *2* сила, необходимая для пластической деформации, несколько ниже за счет меньшей площади контактных поверхностей, так как в осевой центральной части контакт отсутствует, а в случае использования предварительной осадки требуется несколько бóльшая сила, так как контакт осуществляется по всей поверхности торца.

Однако после пересечения кривых *1* и *2* сила, необходимая для пластического деформирования, в случае использования предварительной осадки сначала растет медленнее, а в конечный момент – быстрее.

Работу пластического деформирования определяли как площадь под соответствующей кривой. Но даже визуально заметно, что использование предварительной осадки не только позволяет использовать положительный эффект самоцентрирования, но и ощутимо снижает энергозатраты.

На рис. 6, *б* видно, как увеличение избытка объема исходной заготовки от 10 до 15 % (соответственно, зависимости *2* и *3*) влияет на необходимые силу и рабо-

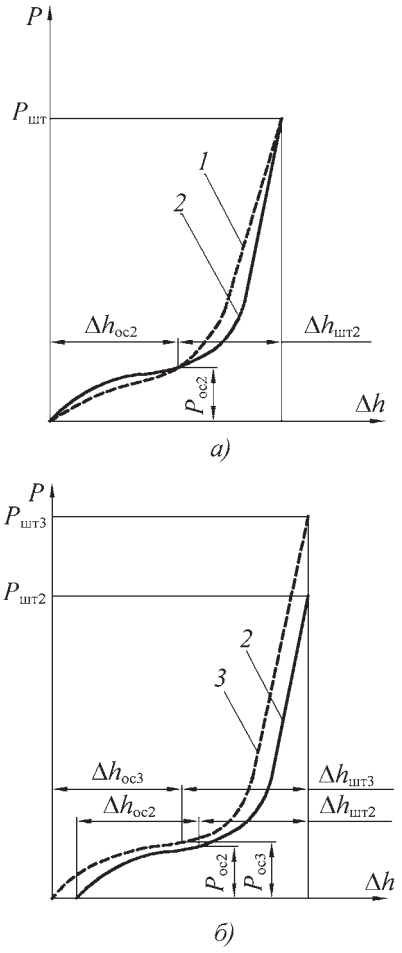


Рис. 6. Экспериментальные зависимости силы осадки и штамповки *P* от величины перемещения Δ*h* деформирующего инструмента для поковки типа *II*:
1 – штамповка без предварительной осадки, $V_з = 1{,}1V_{тпр}$; *2* – предварительная осадка и штамповка, $V_з = 1{,}1V_{тпр}$; *3* – предварительная осадка и штамповка, $V_з = 1{,}15V_{тпр}$

ту пластической деформации. Анализ результатов, полученных по всем четырем типам поковок рассмотренных в данной работе, позволяет сделать вывод, что каждые 5 % избытка материала заготовки увеличивают работу пластического деформирования на 25...30 %, а следовательно, энергию, снимаемую с маховика пресса, который, в свою очередь, каждый раз восполняет ее за счет увеличения энергии, потребляемой электрическим двигателем.

В процессе выполнения данной работы, потребовавшей достаточно большого количества экспериментов, получены результаты, на которые, возможно, следует обратить особое внимание. Практически во всех случаях интенсивное заполнение полостей и углов ручья приостанавливалось с началом выхода металла в облой, и на протяжении всей стадии доштамповки дооформление поковки происходило с подавляющим преобладанием процесса осадки. Поэтому мнение, встречающееся в инженерной среде, о том, что облой также выполняет подпирающую роль и способствует заполнению полости штампа, является неверным, так как при его образовании зоны пластического течения локализуются в области плоскости разъема верхней и нижней половин штампа.

Также обеспечение качественного заполнения штампа за счет увеличения избытка объема металла заготовки выше 15 % является признаком нерационального технологического процесса даже для сложных поковок, так как даже при использовании облойной канавки, состоящей из двух элементов – мостика и магазина, и выполнении соотношений толщины облоя к его ширине, рекомендуемых в справочной литературе, например [2], магазин предохраняет лишь от чрезмерного роста требующейся силы пластического деформирования и разрушения штампа, а также позволяет обеспечить его приемлемую стойкость. В этом случае неоправданно возрастают не только потери металла в облой, но и как показано выше, энергозатраты, так как площадь под кривой $P = f(\Delta h)$ возрастает уже в основном за счет увеличения рабочего хода деформирующего инструмента.

Следует отметить, что экспериментальная оснастка не имела магазина, так как относительная высота облоя и его ширина никогда не превышали значений, рекомендованных в справочной литературе.

Таким образом, можно сделать вывод, что предварительная осадка исходной цилиндрической заготовки, обеспечивающая (в соответствии с предлагаемой методикой) ее самоцентрирование в штамповочном ручье, а также назначение минимальной величины избытка материала заготовки для рассмотренных четырех типов поковок (или близких к ним) позволяют повысить эффективность их производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Мамаев В.Б.** Расчет контура свободной поверхности в процессах осадки и центрирование заготовок в ручьях штампов // Заготовительные производства в машиностроении. 2007. № 8. С. 34–37.

2. **Ковка** и штамповка: Справ.: в 4 т. Т. 2. Горячая штамповка / под ред. Е.И. Семенова. М.: Машиностроение, 1986. 592 с., ил.

Владимир Борисович Мамаев, канд. техн. наук

А.Н. Леванов
(Уральский государственный технический университет–УПИ, Екатеринбург)

Общие закономерности и полезные эффекты контактного трения в процессах обработки металлов давлением

Описаны общие закономерности контактного трения в процессах обработки металлов давлением в виде экспоненциальной зависимости напряжений трения при скольжении от нормальных давлений, оцениваемых по отношению к сопротивлению деформации упрочняющегося материала в тонком приконтактном слое. Показаны возможности совершенствования технологических процессов за счет использования самоустанавливающегося инструмента и активного действия сил контактного трения.

The common regularities of contact friction in the processes of working metals by pressure were described as an exponential dependence of friction stresses from normal pressures under sliding. The normal pressures were estimated relative to deformation resistance of strengthening material in thin contact layer. The possibilities of technological processes perfectioning by means of use of self-installing dies and active acting of contact friction forces were shown.

Систематические экспериментальные исследования контактных напряжений при обработке металлов давлением (ОМД) на кафедре ОМД Уральского государственного технического университета (УГТУ-УПИ) начаты в 50-х годах прошлого столетия. К тому времени теория ОМД располагала большим количеством решений (особенно по определению давления деформируемого металла на инструмент), в которых были использованы традиционные способы определения касательных напряжений для всей контактной поверхности (включая зону прилипания) в зависимости от нормальных напряжений p или сопротивления деформации σ_{TV} обрабатываемого материала через коэффициенты трения μ_p и μ_T соответственно по соотношениям:

$$\tau = \mu_p p; \ \tau = \mu_T \sigma_{TV}, \qquad (1)$$

т.е. по формулам Амонтона–Кулона и Зибеля. Сопротивление деформации во втором соотношении постоянно, так как материал считается идеально пластичным или его свойства учитываются усредненной по объему деформированного тела величиной σ_{TV} сопротивления деформации (для упрочняющегося материала). Коэффициенты трения μ_p и μ_T в указанных соотношениях предполагалось определять для данной пары трения в зависимости от состояния контактной поверхности, а также – в ряде случаев – от скоростных, температурных и других условий деформации.

В то же время были опубликованы экспериментальные данные о контактных напряжениях, противоречащие формулам (1). Это обусловило необходимость широкого экспериментального исследования и поиска более совершенных, чем по Амонтону–Кулону и Зибелю, формул закона внешнего трения при ОМД.

Новый подход к решению проблемы трения при ОМД

В подходах к более глубокому изучению закономерностей трения, получению физической и математической моделей этого явления, формулировке граничных условий краевой задачи с учетом возможностей используемых методов ее решения и накопления опытных данных о константах трения целесообразно выделить две группы задач теории ОМД. К первой из них относятся такие сравнительно простые инженерные задачи, как определение деформации и показателей формоизменения. Для их решения достаточна приближенная оценка величины напряжений трения τ_c, усредненных по всей контактной поверхности, по отношению к сопротивлению деформации $\tau_{TV} = \sigma_{TV}/\sqrt{3}$ или по отношению к среднему нормальному напряжению p_c с помощью соотношений:

$$\tau_c = \psi \tau_{TV}; \ \tau_c = \varphi p_c. \qquad (2)$$

Коэффициенты пропорциональности ψ и φ по аналогии с μ_p и μ_T в формулах (1) также не являются константами для данной пары трения и неизменного состояния контактной поверхности, а изменяются в зависимости от многих факторов, влияющих на напряженно-деформированное состояние обрабатываемого материала (прежде всего от фактора формы очага деформации). Поэтому сомножители ψ и φ в формулах (2) принято называть показателями трения по сопротивлению деформации и нормальным давлениям соответственно. При решении задач первой группы с помощью соотношений (2) не требуется уточнения

характера распределения напряжений трения по контактной поверхности, но значения показателей ψ и φ должны соответствовать действительной средней величине напряжений трения для контактных условий решаемой задачи.

Вторую группу представляют более сложные задачи теории ОМД, связанные с прогнозированием качества получаемой продукции (разрушение металла, формирование структуры, образование текстуры и др.). Для их решения необходимо знать не только величину, но и распределение напряжений трения по контактной поверхности.

Поэтому для решения сложных задач необходима более полная и точная модель трения (описание общих закономерностей), на основе которой можно разработать методику приближенного определения показателей ψ и φ для различных процессов и технологических факторов в них при решении простых задач.

Современный подход к решению проблемы граничного трения при деформации реальных (упрочняющихся) материалов исходит из необходимости рассмотрения состояния контактного элемента деформируемого материала в процессе трения строго для участков скольжения, но независимо от вида процесса ОМД и сочетания технологических факторов для данной пары трения.

В результате такого изучения закономерностей трения должна быть установлена количественная связь напряжения трения со всеми значимыми факторами из числа рассматриваемых: физико-химическое состояние поверхности трения; напряжения; деформации и их скорости в тонком приконтактном слое обрабатываемого давлением материала. В конечном счете необходимы такие обобщения закономерностей трения, которые позволили бы рассчитать напряжения трения при скольжении как функцию напряженно-деформированного состояния обрабатываемого материала в тонком приконтактном слое, инвариантную виду процесса ОМД и технологическим факторам, с использованием универсальных опытных констант, также инвариантных указанным условиям.

Описание общих закономерностей трения в такой постановке основывается на обобщении большого объема опытных данных комплексного исследования контактных напряжений, скольжений и приконтактных деформаций в различных процессах ОМД и на специальных установках исследования трения. Исследования охватывают широкую область изменения технологических параметров, состояний поверхности трения, реологических свойств деформируемых материалов и температурно-скоростных условий деформации.

Методы и объемы экспериментальных исследований

Описание общих закономерностей контактного трения при ОМД основывается на результатах непосредственного измерения суммарных величин контактных напряжений и получения их эпюр. Предложены и широко использованы методы комплексного исследования контактных напряжений, скольжений и приконтактных деформаций. Измерительные устройства, работающие по принципу разрезного инструмента, использованы в опытах по осадке цилиндрических образцов на плоских бойках, при прокатке образцов прямоугольного сечения в гладких валках, при волочении сплошных профилей круглого сечения, а также для определения сил межслойного трения при осадке и прокатке аналогичных биметаллических образцов. При помощи точечных месдоз (универсальных штифтов) получали эпюры нормальных и касательных напряжений при прокатке в гладких валках и простых сортовых калибрах. Для исследования контактных скольжений и приконтактных деформаций при осадке и прокатке использовали устройство "тензометрическая игла" и координатные сетки.

Значительную часть опытов по холодной и горячей деформации выполняли на алюминии и свинце соответственно при комнатной температуре. Для горячей осадки, прокатки, штамповки при высоких температурах использовали, кроме того, образцы из углеродистых, легированных и жаропрочных сталей и сплавов двадцати марок, а также из титанового сплава ВТ3-1. Стальные образцы деформировали при температурах нагрева 900, 1050 и 1150 °С.

Для варьирования скорости деформации осадку проводили на гидравлическом, фрикционном прессе и копре. Прокатку в валках диаметром 169 мм осуществляли при частоте их вращения n = 1 и 140 мин$^{-1}$. В опытах использовали образцы начальным диаметром D_0 и шириной B_0 для осадки и прокатки соответственно в пределах D_0 = 36...28 мм и B_0 = 36...30 мм с варьированием начальной толщины (высоты) в пределах 36...1,5 мм для изменения соотношения размеров очага деформации в широких пределах.

В большинстве экспериментов поддерживали единую шероховатость контактной поверхности инструмента, соответствующую шестому классу шероховатости Ra = 1,6...2,5 мкм; деформацию осуществляли без применения смазки. Влияние шероховатости инструмента и наличия граничной смазки изучали дополнительно.

В качестве примера опытных данных о величине относительных напряжений, усредненных по всей контактной поверхности (о показателях трения в формулах (2)), на рис. 1 представлены кривые, соответствующие горячей осадке цилиндрических образцов из сталей различных марок, нагретых до температуры 950 °С, на бойках основной шероховатости без смазки (обозначения опытных точек для сталей различных марок содержатся на самом рисунке). Эти кривые наглядно иллюстрируют сильную зависимость показателей трения $\psi = \tau_c/\tau_{тv}$ и $\varphi = \tau_c/p_c$ от соотношения размеров осаживаемых цилиндров D/H (фактора формы очага деформации) для данной пары трения и неизменного состояния контактной поверхности. С ними связано также изменение коэффициента напряженного состояния $n = p_c/\sigma_{тv}$ (рис. 1, *а*).

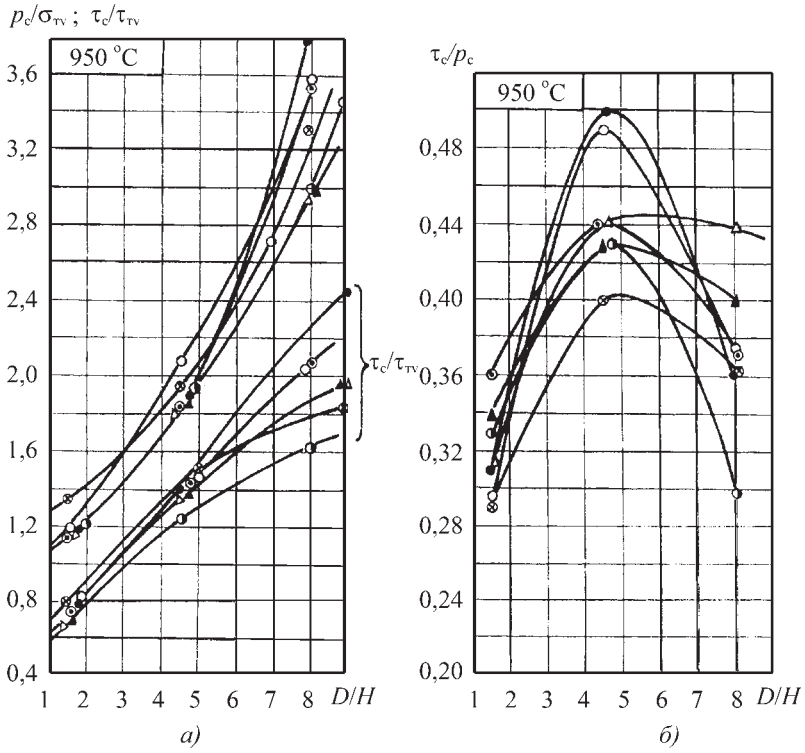


Рис. 1. Относительные контактные напряжения при осадке цилиндрических образцов

• – сталь 45; ○ – У12; Δ – 1Х13; ▲ – 4Х13; ⊙ – 9Х18; ◑ – 9Х28; ⊗ – Р18

Общие закономерности и математические модели трения

Для описания общих закономерностей изучали первоначально по опытным данным для некоторой точки и неизменного состояния контактной поверхности следующие зависимости:

$$\tau = \tau(p, u, \Lambda); \ \tau = \tau(p, u, v_S, \Lambda, H), \qquad (3)$$

где левая формула относится к холодной, а правая – к горячей деформации; τ – напряжение трения; p – нормальное напряжение; u и v_S – соответственно величина и скорость контактного скольжения; Λ и H – соответственно интенсивность скоростей и степень накопленной деформации сдвига.

От соотношений (3) с помощью опытных кривых деформационного и скоростного упрочнения легко перейти к единой зависимости $\tau = \tau(p, \sigma_{тк})$, где $\sigma_{тк}$ – сопротивление деформации тонкого приконтактного слоя обрабатываемого материала.

В результате окончательной обработки экспериментальных данных установлено, что наилучшим образом механизм пластического трения упрочняющегося материала отражает зависимость относительных напряжений трения $\tau/\tau_{тк}$ от относительных контактных давлений $\sigma_п/\sigma_{тк}$ в виде:

$$\tau/\tau_{тк} = K_п\,[1 - \exp(n\sigma_п/\sigma_{тк})], \qquad (4)$$

где $\tau_{тк} = \sigma_{тк}/\sqrt{3}$ – сопротивление деформации чистого сдвига в приконтактном слое; $\sigma_п$ – геометрическая сумма нормального p и касательного τ напряжений; $K_п$ – константа поверхности; n – аппроксимирующий коэффициент, определяемый по опытным данным.

Незначительное огрубление модели (4) путем допущения $\sigma_п = p$ (где p – нормальное напряжение) позволяет рекомендовать формулу

$$\tau/\tau_{тк} = K_п\,[1 - \exp(-1{,}25\,p/\sigma_{тк})]. \qquad (5)$$

Константа поверхности $K_п$ имеет четкий физический смысл. Она представляет собой отношение напряжений трения скольжения к сопротивлению деформации сдвига приконтактного слоя при достаточно высоких нормальных давлениях, при которых практически достигается предел роста напряжений трения от нормальных давлений:

$$K_п = \lim(\tau/\tau_{тк}) \text{ при } (\rho/\sigma_{тк}) \to \infty. \qquad (6)$$

Наиболее существенной в представленном обобщении является возможность раздельного учета влияния состояния контактной поверхности на величину напряжений трения с помощью указанной константы, с одной стороны, и процессов деформации и упрочнения приконтактного слоя деформируемого металла с помощью экспоненциальной функции контактных давлений и сопротивления деформации приконтактного слоя при сдвиге – с другой. Константа $K_п$ учитывает вид пары трения и состояние контактной поверхности в смысле шероховатости, наличия граничной прослойки и иных ее фрикционных свойств.

Константа поверхности $K_п$ инвариантна виду процесса ОМД и технологическим факторам. Она должна определяться опытным путем по результатам стандартных испытаний.

Важно отметить, что входящее в модели (4) и (5) сопротивление деформации $\sigma_{тк}$ приконтактного слоя вносит некоторые трудности в обсуждаемые задачи. Эти трудности различным путем преодолимы при стандартных испытаниях, а также при решении несложных инженерных и более сложных задач, связанных с определением напряженного и деформированного состояний. В этой связи целесообразны некоторые упрощающие допущения как в формулировке закона трения, так и в обосновании выбора показателей средней величины напряжений трения ψ и φ.

Для усредненных по всему участку скольжения нормальных p_c и касательных τ_c напряжений и сопротивления деформации приконтактного слоя $\tau_{ткс}$ по аналогии с моделями (4) и (5):

$$\tau_c/\tau_{ткс} = K_{пс}\,[1 - \exp(n_1\,p_c/\sigma_{ткс})], \qquad (7)$$

где n_1 – аппроксимирующий коэффициент.

В рассматриваемых моделях трения можно оценивать величину напряжений трения и нормальных давлений в некоторой точке контактной поверхности по отношению к сопротивлению деформации, определяемому для средней по объему деформируемой заготовки температуры, степени и скорости деформации. Обозначая это сопротивление через $\sigma_{тv}$ и имея в виду, что величина относительных напряжений трения $\tau/\tau_{тv}$ достигает предела с увеличением $p/\sigma_{тv}$, используемого в качестве критерия оценки состояния контактной поверхности, по аналогии с формулой (5) получаем

$$\tau/\tau_{тv} = K_{пv}[1-\exp(n_2\, p/\sigma_{тv})]. \qquad (8)$$

Аналогичный переход примени́м и к формуле (7).

На рис. 2 приведена номограмма для графического определения значений экспоненциальной функции $\tau/\tau_{тк}$ от $\sigma_п/\sigma_{тк}$ по формуле (4) при значении $n = -1{,}25$. Ясно, что номограмма пригодна также для определения аналогичных функций по формулам (5), (7) и (8) при $n_1 = n_2 = n = -1{,}25$.

С помощью описанных моделей (4)–(8) и номограммы на рис. 2 задача оценки сопротивления деформации приконтактного слоя деформируемого материала, как при испытаниях трения, так и при использовании справочных данных в теоретических решениях, вполне разрешима. Краткое обоснование правильности этого утверждения для упрочняющегося материала приведено ниже.

При определении константы поверхности по номограмме (рис. 2) легче всего использовать оценки относительных напряжений по отношению к $\sigma_{тv}$, т.е. определить $K_{пv}$ из формулы (8). Для конкретного испытания, например, по методике [1], оправдано исследовать неоднородность деформации, определить на этой основе соотношение $\sigma_{тк}/\sigma_{тv}$, оценить напряжения по отношению к $\sigma_{тк}$ и найти по номограмме $K_п$ из формулы (5). При этом для высоких давлений получается следующее соотношение между константами:

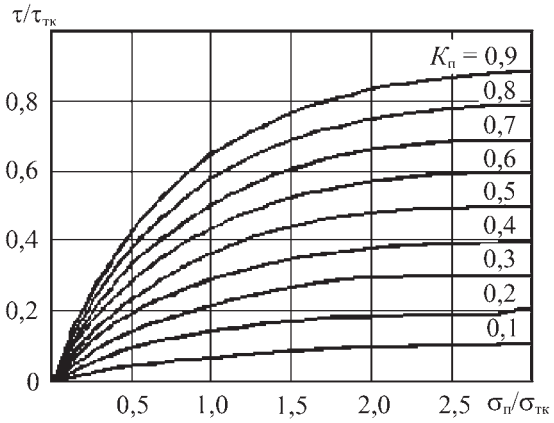


Рис. 2. Экспоненциальная зависимость напряжений трения от контактных давлений и сопротивления деформации приконтактного слоя

$$K_п/K_{пv} = \tau_{тv}/\tau_{тк} = \sigma_{тv}/\sigma_{тк}. \qquad (9)$$

Для систематизации результатов различных авторов по исследованию трения в целях создания единой базы данных значения констант $K_п$ и $K_{пv}$ могут быть определены по номограмме на рис. 2 для любых уровней давлений $p/\sigma_{тк}$ по соответствующим результатам измерений $\tau/\tau_{тк}$.

К незначительным погрешностям в определении напряжений трения по описанным моделям приводит приближенный расчет сопротивления деформации тонкого приконтактного слоя по соотношению $\sigma_{тк} = (\sigma_{тv} + \sigma_{max})/2$, где σ_{max} – сопротивление деформации обрабатываемого материала при предельном упрочнении. Очевидно, что допущения, принимаемые при определении сопротивления деформации приконтактного слоя, не могут приводить к значительным погрешностям, так как при испытаниях трения измеряют абсолютные значения напряжений трения и нормального давления, а при определении относительных величин $\tau/\tau_{тк}$ и $p/\sigma_{тк}$ сопротивление деформации выполняет роль масштаба, в котором оценивают измеренные величины.

Наиболее точные модели (4) и (5) создают методологическую основу в решении проблемы трения и позволяют наиболее строго учитывать силы трения при решении задач второй группы, а также обоснованно выбирать показатели трения ψ и φ для конкретных условий деформации при решении задач первой группы.

Методы испытаний и обоснование выбора показателей трения

Требования к испытаниям в целях накопления справочных данных о константах $K_п$ и $K_{пv}$ вытекают из их физического смысла. При таких испытаниях прежде всего должно выполняться условие скольжения деформируемого материала по инструменту. Важна также возможность оценки деформированного состояния и сопротивления деформации материала в приконтактном слое. Очевидно, наконец, что необходима возможность измерения напряжений трения и нормальных давлений с требуемой точностью. Желательно создание высоких давлений, но с помощью номограммы (рис. 2) возможно определить константы трения также по любому уровню давлений.

Автор успешно применяет испытание трения с помощью самоустанавливающегося инструмента в нестационарном процессе штамповки по способу, описанному в работах [1, 2].

Горячие испытания эмалированных цилиндрических образцов из титанового сплава ВТ3-1 с начальными размерами $D_0 = 30$, $H_0 = 38$, 35, 33 мм, нагретых до температуры 960 °С, осуществляли по способу, описанному в работах [1, 2], на фрикционном прессе ФА-122 номинальной силой 600 кН с помощью установки, позволяющей проводить штамповку образцов в подогретых штампах и измерять силу штамповки в начале подъема обойм с различным уклоном рабочей поверхности (α = 3, 4, 6°).

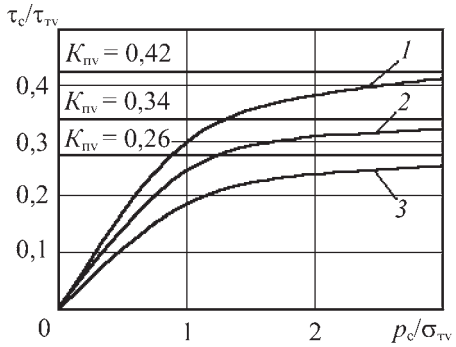


Рис. 3. Зависимость показателя трения по сопротивлению деформации от нормальных давлений для сплава ВТ3-1:
1 – при деформации с эмалью ЭВТ-24; *2* – с эмалью и смазками Hitasol (белый) и Сумидера-184; *3* – с эмалью и графитовыми смазками

Штампы из стали 5ХНМ с твердостью рабочей поверхности 41,5...46,5 HRC и параметром шероховатости Ra = 2,5...1,25 мкм подогревали до температуры 330...340 °С. Средняя скорость перемещения пуансона штампа в процессе деформации составляла 0,17...0,2 м/с. Дополнительные к эмали технологические смазки применяли в виде водных растворов (пять частей воды).

По результатам этих испытаний построены опытные зависимости относительных средних напряжений трения τ_c/τ_{TV} от относительных нормальных давлений p_c/σ_{TV} (рис. 3).

По этим же результатам на рис. 4 представлены зависимости показателя средней величины напряжений трения по нормальным давлениям от уровня этих давлений, которые дополнительно иллюстрируют обоснованность изложенной нелинейной (экспоненциальной) формулировки закона контактного трения при ОМД.

Использование полезных эффектов трения для совершенствования процессов ОМД

Специалистам по обработке металлов давлением хорошо известна эффективность применения технологических смазок в процессах ОМД. Наибольшие сложности представляет подбор смазок для условий горячей деформации. Рассмотренные выше способы испытаний трения позволяют оценивать эффективность смазок для горячей деформации по их смазывающей и теплоизоляционной способностям [2].

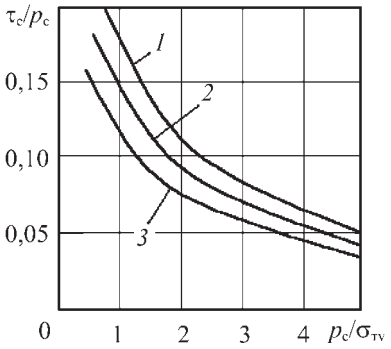


Рис. 4. Зависимость показателя трения по нормальным давлениям деформации от нормальных давлений для сплава ВТ3-1:
1 – при деформации с эмалью ЭВТ-24; *2* – с эмалью и смазками Hitasol (белый) и Сумидера-184; *3* – с эмалью и графитовыми смазками

В результате исследований трения, выполненных на кафедре ОМД УГТУ-УПИ, предложены новые технические решения по совершенствованию штампов для закрытой объемной штамповки за счет использования самоустанавливающегося инструмента в нестационарных процессах ОМД и использованию активного действия сил контактного трения путем принудительного изменения кинематики контактных скольжений за счет комбинированного приложения сил, необходимых для деформации.

Применение самоустанавливающегося инструмента позволяет реализовать процесс малоотходной штамповки круглых в плане изделий из заготовок обычной точности и процесс безотходной штамповки из заготовок повышенной точности. При изготовлении прямоугольных в плане поковок возможна штамповка без штамповочных уклонов. В каждом случае, благодаря наличию самоустанавливающихся элементов, механизм работы штампов таков, что при формоизменении заготовки вплоть до окончательного заполнения полости штампа последний остается закрытым, а в стадии доштамповки может раскрываться или менять свои размеры в пределах допусков на штампуемое изделие. В этой стадии достигается компенсация возможного избытка металла заготовки по отношению к объему полости штампа.

Развитие активного действия сил контактного трения путем изменения кинематики движения деформирующего инструмента позволяет увеличить передачу мощности, расходуемой на деформацию, управлять деформированным состоянием заготовки за счет интенсивного увеличения сдвиговых деформаций, снижать нормальные давления на инструмент [3, 4]. Общие закономерности контактного трения (4) позволяют определить энергосиловые и кинематические параметры, рациональные режимы ведения таких процессов, предельно достижимую величину активных сил контактного трения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **А.с. № 945756 СССР.** Способ определения напряжений контактного трения на поверхности пластически деформируемого материала / А.Н. Леванов, В.К. Катая, В.В. Старших и др. // Открытия. Изобретения. 1982. № 27. С. 211.

2. **Контактное** трение и эффективность применения защитно-смазочных покрытий и технологических смазочных материалов при горячей объемной штамповке / А.Н. Леванов, В.К. Катая, И.М. Володин, В.А. Волков // Кузнечно-штамповочное производство. 1984. № 8. С. 25–27.

3. **Леванов А.Н.** Технологическая эффективность осадки и штамповки с активным действием сил трения // Кузнечно-штамповочное производство. 1995. № 2. С. 6–8.

4. **Леванов А.Н., Паршин В.А.** Гидравлические прессы для осесимметричной осадки и штамповки с кручением // Обработка металлов давлением: Межвуз. сб. Свердловск: УПИ, 1986. Вып. 13. С. 125–129.

Алексей Николаевич Леванов, д-р техн. наук

Н.С. Арсентьева, Л.М. Железняк, Н.Ф. Боков, О.Н. Дашкевич, Е.В. Кузьмина, О.Л. Глухова
(ОАО "Каменск-Уральский завод по обработке цветных металлов",
Уральский государственный технический университет – УПИ, Екатеринбург)

Изготовление нестандартных полос из электротехнической меди в ОАО "Каменск-Уральский завод по обработке цветных металлов"

Рассмотрены технологические особенности производства нестандартных электротехнических изделий – медных полосовых профилей разнообразного назначения, к которым предъявляются достаточно жесткие требования по макро- и микрогеометрии полос, уровню механических свойств, точности размеров, а также по другим качественным и количественным показателям.

The article considers the technological features of non-standard electrical products (copper strips) manufacture.

ОАО "Каменск-Уральский завод по обработке цветных металлов" ("КУЗОЦМ") в течение нескольких последних лет значительно расширил сортамент выпускаемых полуфабрикатов из тяжелых цветных металлов, в том числе путем освоения производства следующих медных нестандартных полосовых профилей электротехнического назначения:

– шин прямоугольного поперечного сечения полутвердого состояния, не предусмотренного стандартом РФ, – для поставки на экспорт;

– прямоугольных шин твердого состояния с повышенной чистотой поверхности (ПЧП);

– шин, поперечное сечение которых выполнено с полным закруглением малых граней профиля;

– мягких прямоугольных полос, ширина которых значительно превышает значения, регламентированные стандартом РФ на медные шины;

– широких прямоугольных короткомерных (длиной 150...350 мм) полос, используемых заказчиком в качестве расходуемых анодов в процессе электролитического растворения.

Для организации промышленного производства указанных выше изделий технологическими службами завода были проведены лабораторно-производственные исследования, по результатам которых расширены технологические возможности оборудования, инструмента и оснастки и достигнуты такие параметры технологического регламента, которые гарантированно обеспечили выполнение технических требований (ТТ) не только российских, но и зарубежных стандартов.

Ниже в кратком изложении приведены основные результаты проведенных НИР.

1. Заказ зарубежного потребителя на изготовление полутвердых шин сечением 6×30 и 10×50 мм, отвечающих ТТ британского стандарта B.S. 1432 (таблица).

Сравнение данных таблицы показало значительные различия ТТ стандартов РФ и Великобритании, в частности по испытанию на загиб, по уровню механических характеристик шин в полутвердом состоянии, а также по качеству их поверхности.

В связи с этим приняли решение о получении этого вида изделий по следующей технологической схеме: горячее прессование на горизонтальном гидравлическом прессе силой 20 МН мерных заготовок, полученных резкой слитка полунепрерывного литья, на промежуточные заготовки под волочение; их травление в 5...15%-ном растворе серной кислоты с последующей промывкой в холодной и горячей воде и сушкой; двухпроходное волочение прессованной заготовки (первый проход – на барабанной машине ВСГ 1/750) с промежуточным полным рекристаллизационным отжигом – в отличие от действующей однопроходной схемы изготовления медных шин; чистовое (отделочное) волочение на цепном волочильном стане силой 300 кН с пониженной степенью деформации в сравнении с традиционной схемой.

В ГОСТ 434–78 для шин твердого состояния временное сопротивление разрыву $\sigma_в$ и относительное удлинение δ не установлены (регламентирована только твердость по Бринеллю), поэтому в основу начального этапа исследования были положены сконцен-

Сравнение требований британского и российского стандартов на шины медные

Характеристика	B.S. 1432	ГОСТ 434–78 [1]
Длина	Мерная, L = 4000 мм	Немерная, L = 3...6 м
Радиус закругления кромок	R = (1±0,15) мм	При толщине $4 < a \le 6$ мм R = (1,05±0,15) мм; $a > 6$ мм R = (1,5±0,30) мм
Кривизна	Менее 10 мм на любых участках шины длиной 2 м	Серповидность по ширине не более 3,5 мм на 2 м длины (для шин марок ШМТ и ШМТВ)
Испытание на загиб (изгиб)	Отсутствие трещин при загибе на 180° вокруг оправки с радиусом, равным толщине шины	Испытание на изгиб на угол 90° вокруг оправки диаметром, равным двойной толщине испытываемого образца (только для шин марки ШМТВ)
Механические свойства	Для полутвердого состояния: $\sigma_в \ge 250$ МПа; $\delta \ge 15$ %. Для твердого состояния: при a = 2,5...8 мм $\sigma_в \ge 289$ МПа; $\delta \ge 4$ %; при a = 8...10 мм $\sigma_в \ge 270$ МПа; $\delta \ge 8$ %	Величина $\sigma_в$ не регламентирована. Твердость шин марок ШМТ и ШМТВ не менее 65 НВ. Для шин марки ШММ: при $2,5 < a \le 7$ мм $\delta \ge 37$ %; при $a > 7$ $\delta \ge 40$ %
Состояние поверхности	Должна быть чистой и гладкой, без вредных дефектов	Допускаются поверхностные потемнения в результате окисления и наличие следов технологической смазки
Обозначения: ШМТ – шины медные твердые; ШМТВ – шины медные твердые из бескислородной меди; ШММ – шины медные мягкие.		

трированные в информационно-аналитическом центре завода данные по механическим свойствам полутвердых медных прутков диаметром 9...40 мм, выпускаемых согласно ГОСТ 1535–90.

Значениям механических свойств $\sigma_в \ge 280$ МПа и $\delta \ge 20$ %, полученные при степени деформации в процессе чистового волочения ε = 14...18 %, хорошо коррелируют с показателями полутвердого состояния, приведенными в таблице. На основании этих данных рассчитали маршруты волочения, а при выпуске опытно-промышленных партий предусмотрели дополнительные меры, обеспечивающие соблюдение надлежащего высокого качества поверхности шин:

– для предупреждения механических повреждений протянутых полос при их падении в приемный карман усовершенствовали цепной волочильный стан силой 300 кН;

– предусмотрели увеличение припуска на доведение и полирование канала волок после его электроэрозионного вырезания;

– во избежание повреждения в процессе волочения поверхности прессованной заготовки при повышенных (с учетом плюсового допуска) размерах ее сечения увеличили угол входной зоны канала волоки первого прохода волочения;

– проводили регулярную очистку канала волок от налипшей меди в чистовом проходе волочения;

– предусмотрели увязку бунтов промежуточной заготовки (так называемой подтяжки) перед ее отжигом в конвейерной печи только медной проволокой, поскольку при увязке стальной проволокой на подтяжке оставались вмятины, частично сохранявшиеся после отделочного волочения;

– для транспортирования по операциям с помощью мостового крана прессованной заготовки и подтяжки применяли капроновые стропы.

Особое внимание обратили на нахождение наиболее целесообразного и эффективного способа смягчающего отжига подтяжки. После опробования многих вариантов отжига, отличающихся по температуре и времени выдержки и использованием различных агрегатов электронагрева (лабораторных печей, камерной печи, конвейерной печи с водяными затворами, проходной роликовой печи), стабильные качественные и количественные показатели, соответствующие ТТ стандарта (по механическим свойствам, испытанию на загиб, состоянию поверхности и др.) были достигнуты только после отжига бунтовых заготовок в печи конвейерного типа.

Отжиг подтяжки в отрезках, собранных в пакеты, проведенный в других агрегатах, не обеспечивал полноту прохождения процесса рекристаллизации равномерно во всем объеме садки по следующим причинам: во-первых, из-за недостижения необходимой для рекристаллизации температуры металла в области торцев пакета; во-вторых, из-за недостаточной для измельчения зерен степени деформации в первом проходе волочения, вызванной уменьшением сечения прессованной заготовки с превращением его в двояковогнутое – по причине "заплывания" канала прессовой мат-

рицы при высоких контактном давлении и температуре, свойственных процессу прессования. Полноту прохождения процесса рекристаллизации проверяли прибором для измерения электропроводности меди непосредственно на металле в цеховых условиях.

В качестве третьей причины, тесно связанной со второй, с высокой долей вероятности можно назвать недостаточную степень деформации ε по большой стороне сечения в первом проходе волочения. Эта величина соответствовала критической, которая, как известно [2], для большинства промышленных металлов и сплавов составляет 3...15 %.

В процессе отжига подтяжки произошел интенсивный рост зерна, который и привел к снижению пластичности металла. Доказательством факта повышения размера зерна (при отсутствии специального исследования микроструктуры) и соответствующего снижения пластичности явилось появление на поверхности готовых шин при их испытании на загиб дефекта типа "апельсиновая корка" – неровной, бугристой поверхности.

Была предпринята попытка сократить маршрут волочения и получить шину сечением 10×50 мм однопроходным волочением из прессованной заготовки сечением 12×52 мм (т.е. с ε = 20 %), но она оказалась неудачной, а именно: качество поверхности готовых шин уступало качеству шин, полученных двухпроходным волочением, хотя они удовлетворяли ТТ по механическим свойствам и выдерживали испытание на загиб. Вместе с тем при всех испытанных параметрах технологического регламента механические характеристики ($\sigma_в$ и δ) не выходили за установленные стандартом пределы.

Заказ зарубежного потребителя на промышленные партии медных шин полутвердого состояния поставки успешно выполнен, но работа продолжается: составлен и осуществляется план дополнительных мер по повышению качества прессованной заготовки (в частности, ведется усовершенствование выходной стороны пресса силой 20 МН, увеличена стойкость матриц против "заплывания" и др.), а также условий транспортирования металла по операциям и его обработки на волочильном переделе.

2. На медные шины твердого состояния поставки, имеющие повышенную чистоту поверхности, в производстве заказчика должно наноситься электролитическим методом серебряное покрытие, что обеспечивает в эксплуатационных условиях наивысшую электропроводность шин в местах контакта, и это порождает исключительно высокие требования к состоянию их поверхности с позиции шероховатости ($Rz \leq$ $\leq$ 0,63 мкм по ГОСТ 2789–73).

Основная проблема заключается в том, что согласно ГОСТ 434–78 параметр шероховатости шин по существу не регламентирован, он должен укладываться в пределы удвоенного допуска размеров поперечного сечения. Это означает, что, например, для шины сечением 5×50 мм этот параметр может достигать 100 мкм для размера 5 мм и 280 мкм для размера 50 мм, следовательно, его нормированные стандартом значения в 220 и 440 раз соответственно превышают параметр шероховатости, установленный потребителем.

Требуемый параметр шероховатости поверхности шин был достигнут на производстве применением комплекса специальных технологических приемов, а именно:

– установлением режима обжатий с оптимальным распределением коэффициентов вытяжки в предчистовом и чистовом проходах волочения;

– совершенствованием процесса травления прессованной заготовки и подтяжки в целях недопущения осаждения на их поверхности выделившейся из раствора первичной меди;

– подготовкой поверхности полос перед чистовым волочением;

– наиболее высоким качеством обработки рабочего канала волок и приданием ему соответствующей формы.

Полученный уровень параметра шероховатости ($Rz \leq 0{,}63$ мкм) обеспечивает нанесение серебряного покрытия точно заданной, однородной по поверхности шины толщины; тем самым удается создать контактные поверхности, обладающие низким переходным сопротивлением и высокой электропроводностью, что позволяет получить на предприятии-потребителе значительную экономию серебра.

За достигнутые высокие эксплуатационные характеристики и надлежащие служебные свойства, экологическую безопасность и оптимальное сочетание умеренной цены и стабильных показателей качества нестандартные твердые медные шины с повышенной чистотой поверхности производства ОАО "КУЗОЦМ", предназначенные для электротехнических целей и востребованные предприятиями машиностроительного и энергетического комплекса РФ и стран СНГ, награждены дипломом программы "Сто лучших товаров России". Кроме того, данный вид продукции защищен патентом РФ на полезную модель [3].

3. По ГОСТ 434–78 в углах сечения шин предусмотрены закругления (см. таблицу). Вместе с тем ряд заказчиков стремится использовать шины с полным закруглением малых граней сечения, т.е. с профилем, выполненным с радиусом, равным половине толщины шины. Такие полосы с полным закруглением малых сторон профиля имеют следующие существенные преимущества в сравнении с традиционной формой сечения: повышается стойкость изоляционного покрытия вследствие отсутствия его резких перегибов на углах профиля, достигается определенная экономия

меди, улучшается распределение токовой нагрузки по поперечному сечению шины.

Для получения шин, отвечающих этому требованию заводов-потребителей, изготовили и далее применили в прессовом и волочильном переделах производства соответствующий технологический инструмент – прессовые матрицы и волоки с требуемой формой каналов. Определенные трудности, проявившиеся при их доводке и полировке (для каналов волок) после электроэрозионного вырезания, были преодолены, что обеспечило выпуск промышленных партий этого вида нестандартных электротехнических профилей надлежащего качества, полностью соответствующих требованиям заказчиков.

4. Заказ на мягкие заготовки, ширина и толщина которых значительно превышает установленные нормой стандарта ширину и толщину шин, поступил от ОАО "Кольчугцветмет", где они предназначались для получения холоднокатаных лент. При длине заказываемых заготовок 2400...2600 мм, ширине 200...220 мм и толщине 16...20 мм они должны отвечать высоким требованиям по качеству поверхности, практически идентичным требованиям к холоднотянутым полуфабрикатам; кроме того, следовало соблюсти жесткие условия по макрогеометрии заготовок – продольной и поперечной разнотолщинности, плоскостности, серповидности и радиусам закругления углов сечения. Естественно, что по площади поперечного сечения эти заготовки значительно отличаются от стандартных медных шин, и это наряду со строгими требованиями к их качественным показателям обусловило появление дополнительных трудностей при производстве таких широких и толстых заготовок.

В ходе проведения подготовки к выпуску в горячепрессованном состоянии этих нестандартных и нетрадиционных для завода изделий проектно-конструкторским отделом спроектированы, а затем ремонтно-механическим цехом завода изготовлены новые, рассчитанные на повышенные размеры заготовок матрицы и матрицедержатели, а также устройство для их резки (раскроя) на стеллаже пресса; изготовлены и смонтированы ролики с гладкой бочкой увеличенной длины для окончательной правки полос на девятироликовой правильной машине.

В результате реализации отмеченного комплекса мероприятий промышленные партии заготовок были отпрессованы из порезанных на мерные длины цилиндрических слитков полунепрерывного литья на горизонтальном гидравлическом прессе силой 35 МН и после операций раскроя и правки в полном согласии с ТТ соответствующих ТУ успешно сданы потребителю.

5. Организовано изготовление промышленных партий нестандартных медных горячепрессованных заготовок прямоугольной формы примерно такого же типа, как в п. 4, но шириной 100...160 мм, толщиной 10...20 мм и длиной всего 150...350 мм, предназначенных для их использования у потребителя в качестве электролитически растворяемых анодов. Отличие этих анодов от рассмотренных выше полос состоит не только в их короткомерности, но и в строго регламентированных допускаемых отклонениях по длине и косине реза, составляющих ±2 мм, что сразу же отрицает возможность использования действующих устройств, установленных для резки пресс-изделий на стеллаже пресса.

Для соблюдения требуемой точности резки был приобретен и введен в эксплуатацию отрезной станок "Сириус" (Россия), у которого в качестве инструмента используется ленточное полотно малой толщины – всего 0,8...1,3 мм. В результате добились надлежащей точности отрезаемых заготовок, а также получили экономию металла путем сокращения отходов на стружку при резке полос на станке "Сириус" по сравнению с ранее применявшимися дисковыми пилами, у которых толщина диска равна 10...12 мм. Немаловажно, что при таких коротких заготовках благодаря осуществлению одновременной резки пакета, собранного из многих полос, удалось значительно повысить производительность труда на этой операции.

Таким образом, ОАО "КУЗОЦМ" реализовал существенное расширение номенклатуры выпускаемой продукции за счет организации производства нетрадиционных для завода нестандартных электротехнических изделий – медных полосовых профилей разнообразного назначения, к которым предъявляются существенно различные и жесткие требования, касающиеся макро- и микрогеометрии, уровня механических характеристик, точности размеров и других показателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **ГОСТ 434–78.** Проволока прямоугольного сечения и шины медные для электротехнических целей. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1989. 20 с.

2. **Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П.** Материаловедение: учеб. для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1990. 528 с.

3. **Пат. 31781 РФ.** Полоса из меди и медных сплавов / Ю.Н. Логинов, П.А. Василевский, А.И. Снигирев и др. Опубл. 27.08.03, Бюл. № 24.

Наталья Сергеевна Арсентьева, гл. инженер;
Лев Моисеевич Железняк, канд. техн. наук;
Николай Федорович Боков, гл. технолог;
Олег Николаевич Дашкевич, начальник цеха;
Елена Васильевна Кузьмина, зам. гл. технолога;
Ольга Леонидовна Глухова, студентка

И.Е. Семёнов, С.Н. Рыженко, С.В. Поворов
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Динамическое моделирование процесса локальной гибки-формовки для технологий производства покрытий для крыш*

Рассмотрены результаты динамического моделирования процесса обработки тонколистового металла эластичным рабочим инструментом по методу гибки-формовки. Приведены результаты теоретического расчета и пример технологии изготовления нового покрытия для крыш зданий.

The article considers the results of the dynamic modelling of a thin-sheet metall treatment by the elastic tool using bending-forming method. The results of theoretical calculation and an example of technology for roof coverings manufacture are brought.

В настоящее время в процессах листовой штамповки часто применяют эластичную среду в качестве рабочего инструмента, что приносит существенную прибыль для серийного и мелкосерийного производства. Однако дополнительное деформирование самой эластичной среды ведет к появлению больших сил (давлений) и, соответственно, повышению энергоемкости процессов.

Снижение энергоемкости данных процессов становится одной из самых важных проблем. Поэтому актуальна проблема локализации очага пластической деформации, особенно в процессах штамповки эластичными средами.

Локализация очага деформации как средство уменьшения сил известна давно (процессы прокатки, раскатка, разгонка (при ковке), секционная штамповка и т.п.), однако в последнее время все шире используется локализация очага и для расширения технологических возможностей, например для увеличения допустимой степени деформации и т.п. Локализация очага деформации является одним из важнейших факторов, обеспечивающих оптимальный ход технологии обработки листовых металлов давлением, определяющий энергозатраты на формоизменение заготовок и их качество.

Особый интерес представляют процессы изготовления листовых заготовок, имеющих выпукло-вогнутую рельефную поверхность на устройствах локальной формовки. Формирование рельефа на поверхности заготовок при этом проводится при пропускании последних между рельефной поверхностью матрицы, установленной на столе с приводом горизонтального перемещения и вращающимся валом с эластичной оболочкой из полиуретана. Так как формовка по данной схеме осуществляется в открытом объеме (эластичной среды), то невозможно получить большие давления в эластичной среде, что сказывается на технологических возможностях этого процесса.

Однако при формовке тонких листовых заготовок ввиду локальности воздействия нагрузок появляется возможность при относительно небольших давлениях производить формовку на очень больших площадях (до нескольких квадратных метров) при минимальных затратах энергии.

В строительстве в последние годы широкое применение находят листовые покрытия для крыш в виде гофрированного (волнистого) листа с рельефным рисунком на поверхности, имитирующем черепицу. На рис. 1 представлена схема стана для получения таких покрытий из листовой заготовки методом локальной гибки-формовки.

Стан работает следующим образом. Электродвигатель *1* через редуктор *2* и пару винт *4* – гайка *5* приводит в движение стол *12* с матрицей *13*. На матрице *13* под прижимной планкой *10* находится листовая заготовка *11*. Пружина *9* связана с траверсой *7* и передает силу на рабочий вал с эластичной оболочкой *8*. В начальный момент времени стол с матрицей находится в крайнем правом положении и на него устанавливают заготовку *11* и фиксируют ее левой прижимной планкой *10*.

Далее включают двигатель, и стол начинает двигаться влево, при этом вал *8* под действием пружины *9*

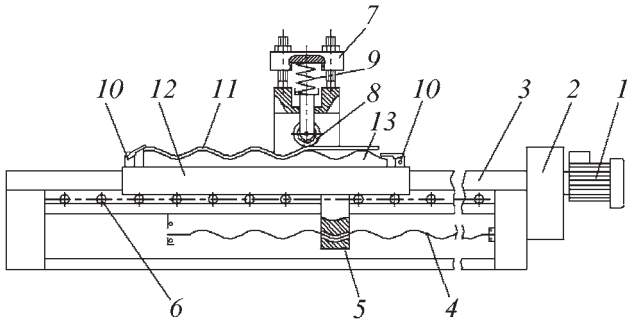


Рис. 1. Схема базового стана локальной гибки-формовки

* Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по образованию РФ в рамках аналитической ведомственной Программы "Развитие научного потенциала высшей школы (2006–2008 годы)".

деформирует эластичную оболочку, которая прижимает заготовку к матрице, вследствие чего заготовка деформируется и принимает форму, близкую к форме поверхности матрицы. Таким образом, рельефный рисунок, нанесенный на поверхность матрицы, переносится на листовую заготовку (происходит процесс формовки), параллельно процессу формовки происходит процесс гибки заготовки.

Однако стан данной конструкции имеет значительные технологические ограничения. Для получения качественной продукции, т.е. чтобы рельеф матрицы четко переносился на заготовку, необходимо чтобы в очаге деформации со стороны эластичного рабочего инструмента на нее действовало контактное давление не менее 12...15 МПа. В свою очередь контактное давление на заготовку прямо пропорционально силе, которую создает пружина, и обратно пропорционально площади пятна контакта между заготовкой и инструментом.

В процессе деформирования можно выделить две характерные точки:

1) рабочий вал находится на гребне матрицы (см. рис. 1). Здесь пружина сжата и передает необходимую силу на эластичную оболочку, которая создает требуемое давление на заготовку;

2) рабочий вал находится во впадине. В этом случае пружина разжимается и сила, передаваемая на вал, уменьшается. Вместе с тем площадь пятна контакта увеличивается, вследствие чего контактное давление на заготовку в этой зоне значительно меньше требуемого, и происходит недоформовка листа (рис. 2).

Поэтому стан данной конструкции способен производить качественную продукцию только при использовании заготовок толщиной до 0,5...0,8 мм из мягких алюминиевых сплавов типа АМц.

Авторами статьи разработана новая конструкция стана, которая позволила расширить технологические параметры процесса.

На рис. 3 представлена схема стана [1], в которой силы, прикладываемые к валу, создаются не пружиной, а роликом, который движется по копирующей рейке и жестко связан с рабочим валом. На станине *1* установлен привод горизонтального перемещения стола *17*, который состоит из электродвигателя *3*, редуктора *2*, ходового винта *4* с гайкой *5* и роликов *7*.

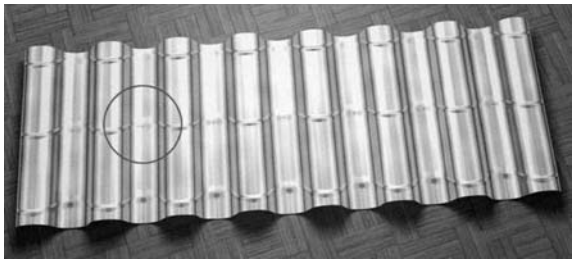


Рис. 2. Образец полуфабриката с недоформовкой рельефного выступа

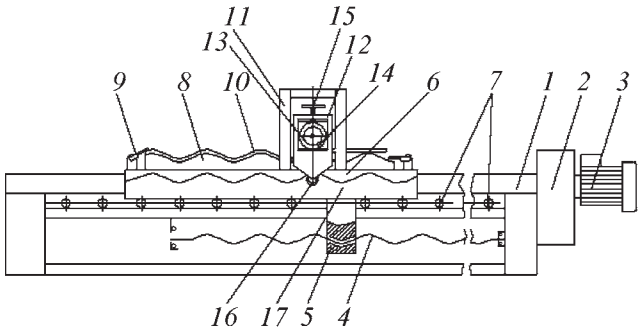


Рис. 3. Схема стана локальной гибки-формовки новой конструкции

Гайка *5* жестко связана со столом *17*. На столе закреплена матрица *8* на которую устанавливается листовая заготовка *10*, два прижима *9* и рейка *6*, копирующая профиль матрицы. Также на станине жестко закреплен узел вертикального перемещения вала *14* с валом с эластичной оболочкой *13*.

Стан работает следующим образом: в исходном состоянии стол находится в крайнем правом (см. рис. 3) или левом положении, на матрице установлена листовая заготовка, которая зафиксирована левым прижимом.

От электропривода стол приводится в движение через передачу винт–гайка и движется по роликам *7* справа – налево. При этом копирующий ролик *16* отслеживает профиль рейки *6* и задает вертикальное перемещение вала с эластичной оболочкой. Процесс заканчивается, когда стол достигает крайнего левого положения. В этом положении прижим *9* поднимается и готовый полуфабрикат снимается с матрицы. Затем новая заготовка устанавливается на матрицу, фиксируется правым прижимом и стол начинает движение в обратном направлении. Далее процесс повторяется.

Для проектирования такого стана и разработки технологии производства изделий на нем нужно знать некоторые параметры технологического процесса, такие как: сила, необходимая для деформирования листа; вертикальное перемещение (предварительное смещение вниз) деформирующего инструмента (вала с эластичной оболочкой); степень деформации оболочки, а также энергетические параметры процесса. Эти данные можно получить с помощью теоретических расчетов.

Теоретическое исследование проводили с использованием специального комплекса программ "ANSYS/LS-Dyna", бесплатно предоставленного МГТУ им. Н.Э. Баумана московским представительством фирмы CAD-FEM GmbH. Этот программный комплекс позволяет моделировать динамические процессы обработки металлов давлением.

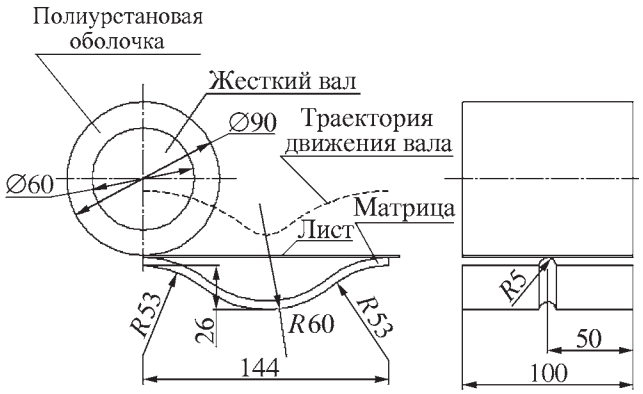


Рис. 4. Геометрическая схема деформирования

На рис. 4 представлена схема деформирования листа толщиной 0,8 мм вращающимся валом с эластичной оболочкой. Рассмотрены следующие контактные пары: матрица – лист – эластичная оболочка – жесткий вал. При этом приняты следующие исходные данные для расчета: вал диаметром 60 мм и длиной 600 мм изготовлен из стали 35 с модулем упругости $E = 210\,000$ Н/мм^2 и коэффициентом Пуассона $\nu = 0{,}3$; эластичная оболочка из полиуретана СКУ – ПФЛ (условный модуль упругости $E = 20$ Н/мм^2), коэффициент трения на контактных поверхностях $f = 0{,}14$; деформируемый лист толщиной 0,8 мм из сплава АМц; матрица шириной 600 мм, изготовлена из стали 45 с $E = 215\,000$ Н/мм^2 и $\nu = 0{,}25$.

Для ускорения расчета использовали условия симметрии, которые позволили рассматривать только центральную часть матрицы с рельефным выступом шириной 100 мм, а не всю модель шириной 600 мм. На рис. 5 представлена конечно-элементная модель.

Модель содержит пять подконструкций, моделирующих: матрицу, лист, эластичную оболочку, жесткий вал и ось вала, к которой прикладываются нагрузки. Зоны контакта задавались контактными парами, которые определялись в процессе расчета.

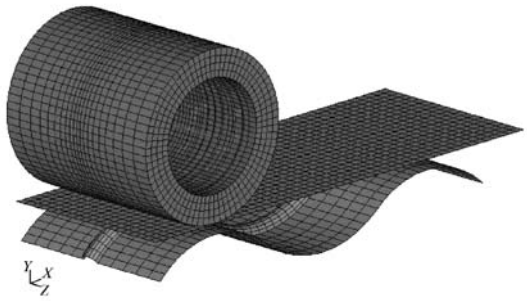


Рис. 5. Конечно-элементная модель

Рис. 6. Деформированная конечно-элементная модель

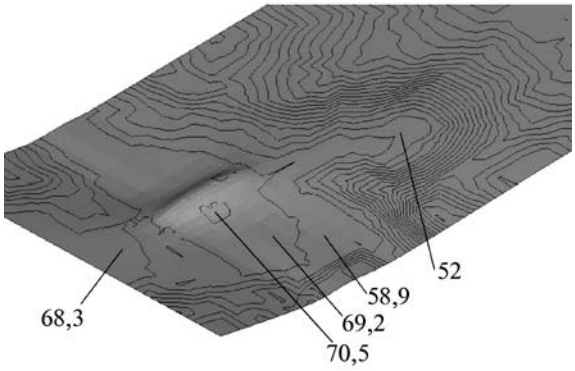


Рис. 7. Поля распределения эквивалентных напряжений, МПа

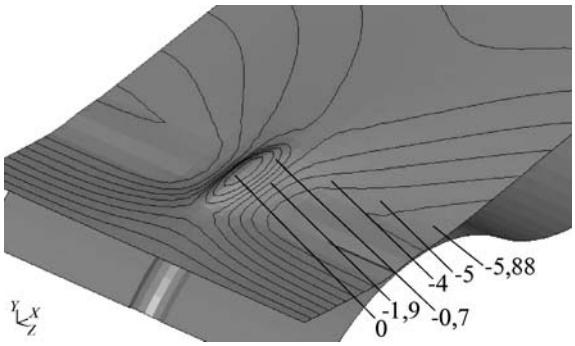


Рис. 8. Поля перемещений, мм, по направлению оси *y*

На рис. 6 приведена деформированная конечно-элементная модель.

В результате расчета получим поля перемещений, напряжений и деформаций в эластичной оболочке и листе, а также энергосиловые параметры процесса. На рис. 7 представлены поля распределения эквивалентных напряжений в листе.

Как видно из рис. 7, максимальные эквивалентные напряжения в листе 70,5 МПа возникают в зоне формирования рельефного выступа, т.е. там, где происходят максимальные деформации листа.

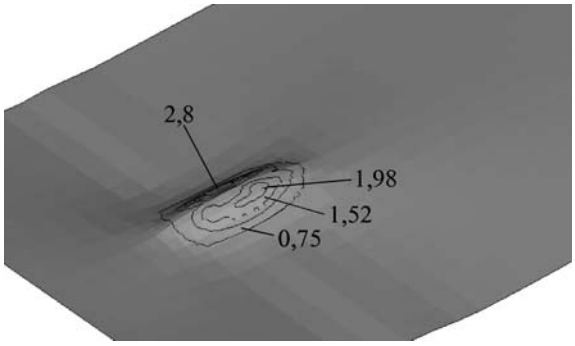


Рис. 9. Поля эквивалентных деформаций по Мизесу, %

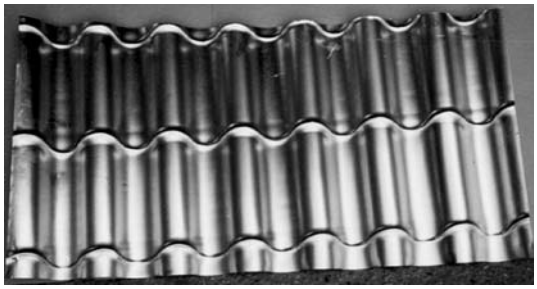


Рис. 10. Заготовка, полученная на стане локальной гибки-формовки

На рис. 8 показаны поля перемещений вдоль оси *y* в листовой заготовке при ее деформировании.

На рис. 9 представлены поля распределения эквивалентных деформаций по Мизесу. Как видно из рисунка, значение максимальной эквивалентной деформации в листе 2,8 %, что является вполне допустимым для исследуемого материала с точки зрения разрушения.

Для проверки правильности работы математических моделей проведены эксперименты деформирования листов из АМц толщиной 0,8 мм по предложенной схеме. С первого прохода удалось получить качественную проработку рельефного выступа на предварительно окрашенном листе (рис. 10).

Таким образом, из технологического процесса можно исключить операции подготовки к окраске и окраски в электростатическом поле порошковыми красителями. На рис. 11 представлен внешний вид полученного покрытия для крыш.

Технологический процесс получения гофрированного покрытия для крыш состоит из следующих основных операций:

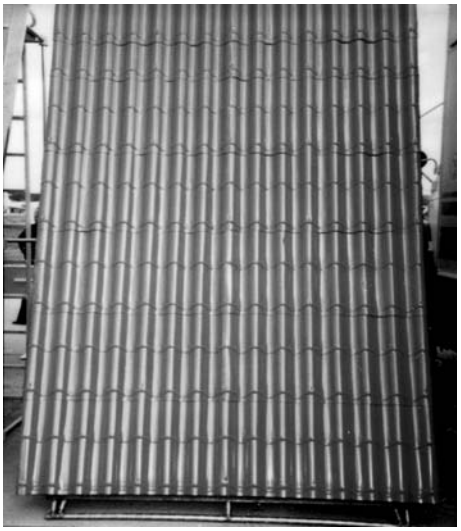


Рис. 11. Образец готовой продукции

1. Резка рулона (листа) на заготовки на ножницах.
2. Обработка на стане гибки-формовки эластичным инструментом.
3. Обезжиривание поверхности (подготовка к окраске).
4. Окраска в электростатическом поле порошковыми красителями.
5. Сушка в печи.

В результате проведенных теоретических исследований была предложена новая конструкция стана локальной гибки-формовки, позволяющая расширить технологические возможности процесса, а также создана конечно-элементная модель и проведен теоретический расчет деформирования тонколистового металла эластичной оболочкой.

Полученная модель позволяет определять напряженно-деформированное состояние в любой момент деформирования, как в тонколистовом металле, так и в оболочке из эластомера и получить все необходимые энергосиловые параметры для расчета техпроцесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пат. 2197354 РФ,** МКИ5 B 21 D 22/10, 5/14. Стан локальной формовки-гибки для изготовления изделий с рельефной поверхностью из листового металла / И.Е. Семёнов, В.М. Тюрин, С.Н. Рыженко и др. № 2001113232; заявл. 17.05.01; опубл. 27.01.03, Бюл. № 3.

Иван Евгеньевич Семёнов, д-р техн. наук;
Сергей Николаевич Рыженко, канд. техн. наук;
Сергей Владимирович Поворов, инженер

УДК 621.777.4+669.14

А.А. Филиппов, Г.В. Пачурин *(Нижегородский государственный технический университет)*

Температура изотермической закалки калиброванного проката из стали 40Х под холодную высадку

Приведены экспериментальные данные по оптимизации технологической обработки стали 40Х для получения высокопрочного крепежа холодной высадкой, что позволяет значительно снизить энергоемкость процесса и себестоимость конечного продукта.

Experimental data on optimization of technological processing if 40X steel for the of high-strength fixture reception by a method of cold landing that allows to lower considerably power consumption of the process and the cost price of an end-product is resulted.

В настоящее время при общем росте объемов и темпов производства машиностроение остается одним из основных постоянных потребителей крепежных изделий, значительную долю которых составляет высокопрочный крепеж, используемый в автомобилестроении.

Процесс его производства условно можно разделить на два этапа:

– изготовление калиброванного проката;

– изготовление крепежа методом холодной высадки и его термообработка.

Изменение технологии и варьирование технологических параметров на каждом этапе позволяют существенно изменять себестоимость конечного продукта.

Анализ литературных и производственных данных позволил выделить основные параметры, влияющие на качество калиброванного проката под холодную высадку:

– способность выдерживать осадку до 1/3–1/4 первоначальной высоты образца;

– удовлетворительная микроструктура;

– временное сопротивление разрыву $\sigma_в$;

– относительное удлинение δ;

– относительное сужение ψ;

– твердость проката HRC.

В работе [1] показано, что идеальной микроструктурой калиброванного металлопроката для холодной высадки крепежа является зернистый перлит. Крепеж, высаженный из металлопроката с вышеуказанной микроструктурой, должен быть подвержен закалке, чтобы согласно ГОСТ 1759–72 соответствовать классу прочности 8.8 и более. После закалки крепеж приобретает необходимую твердость и прочность. Но закалка может вызвать различные дефекты, в том числе коробление, деформации, трещины и обезуглероживание поверхности.

Одним из перспективных направлений производства высокопрочного крепежа является подготовка калиброванного проката с механическими и пластическими свойствами, позволяющими проводить холодную высадку изделий с прочностными показателями класса прочности 8.8 и более, исключающими их дальнейшую закалку. Чтобы получить оптимальные свойства калиброванного проката, нужно точно установить режим термической обработки. В качестве промежуточной термической обработки применяют изотермическую закалку. Изотермическая закалка позволяет получать требуемую твердость и обеспечивать оптимальное сочетание всех механических свойств и твердости калиброванного проката.

Для исследования механических свойств, твердости и микроструктуры калиброванный прокат из стали 40Х подвергали изотермической обработке по разным режимам. Было отобрано три образца калиброванного проката диаметром 12,8 мм от трех плавок. Микроструктура калиброванного проката стали 40Х в исходном состоянии – зернистый перлит в переходной стадии к зернистому с ферритом. Химический состав стали 40Х приведен в таблице.

Термическая обработка образцов заключалась в их нагреве в соляной ванне до температуры 880 °С и изотермической закалке в селитровой ванне (50 % KNO_3 + 50 % $NaNO_3$) в течение 5 мин при температурах: 400, 425, 450, 500 и 550 °С. После выдержки в селитровой

Химический состав стали 40Х исследованных плавок

№ плавки	Массовая доля элементов, %					
	C	Mn	Si	P	S	Cr
542345	0,38	0,58	0,20	0,011	0,007	0,86
79327	0,40	0,70	0,19	0,06	0,024	0,97
68664	0,43	0,60	0,27	0,018	0,024	1,00

ванне образцы проката охлаждали на воздухе в течение одной минуты, а затем – в воде.

Механические свойства образцов калиброванного проката после изотермической закалки определяли на разрывной машине ЦДМ-100, твердость – на приборе Роквелла по шкале С, на параллельно прошлифованных лысках. Микроструктуру изучали на поперечных микрошлифах с использованием металлографического микроскопа "Неофот-21" при увеличении ×500. Травление образцов проводили в 4%-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте.

После изотермической закалки при температурах 400, 425, 450 и 550 °С образцы имеют структуру сорбита. Изотермическая закалка при температуре 500 °С вызывает появление в структуре стали 40Х участков мартенсита вследствие неполного распада аустенита при изотермической выдержке в течение 5 мин и превращения оставшегося аустенита в мартенсит при последующем охлаждении. Это видно на диаграмме изотермического распада аустенита стали 40Х (рис. 1).

Механические свойства образцов данной стали в зависимости от температуры изотермической выдержки приведены на рис. 2.

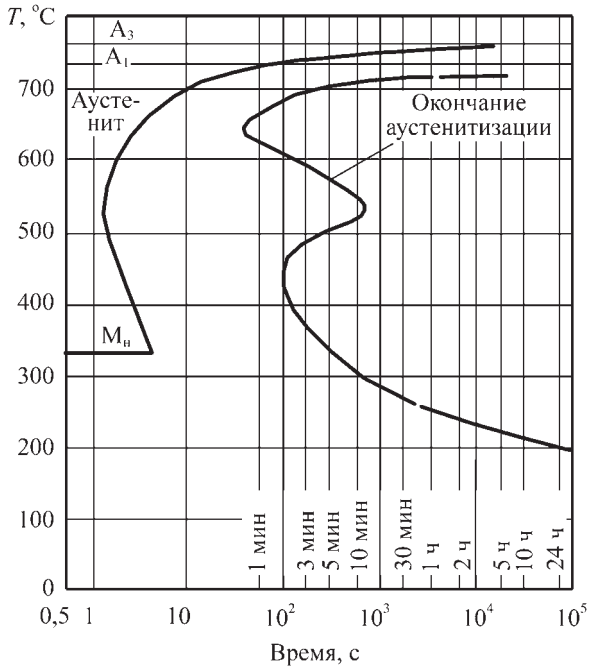


Рис. 1. Кривые изотермического распада аустенита в стали 40Х

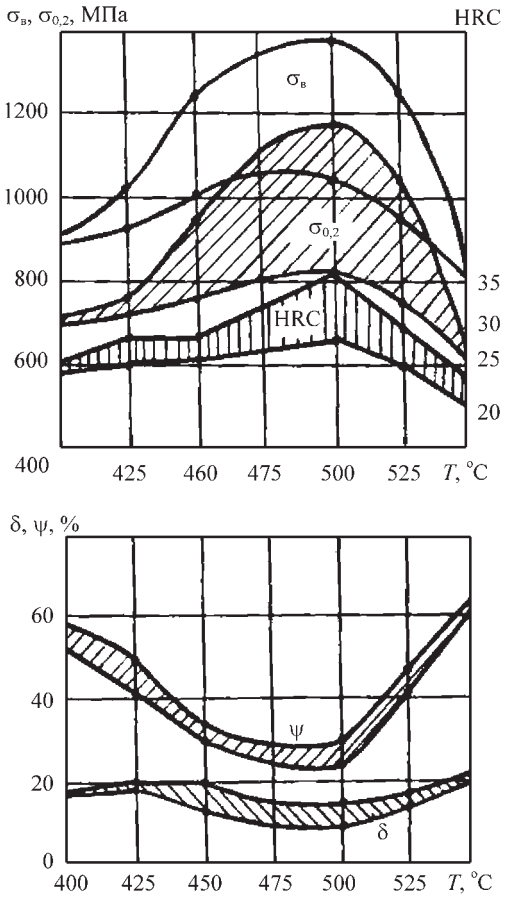


Рис. 2. Механические свойства калиброванного проката стали 40Х в зависимости от температуры изотермической выдержки

На графиках заштрихованы области разброса значений для разных плавок. Наилучшее сочетание прочности, пластичности и твердости достигается после изотермической выдержки при температуре 400 °С: $\sigma_в$ = 900...920 МПа; HRC = 24...25; δ = 18...19 %; ψ = = 56...57 %; $\sigma_т$ = 700...730 МПа.

Данные значения свойств калиброванного проката согласно ГОСТ 1759–72 соответствуют классу прочности 8.8.

Увеличение температуры изотермической выдержки до 500 °С приводит к значительному повышению прочности и резкому снижению пластичности калиброванного проката. Это объясняется тем, что за 5 мин при 500 °С не заканчивается полностью превращение аустенита и при дальнейшем охлаждении оставшийся аустенит переходит в мартенсит. Калиброванный прокат с такой микроструктурой и низкой пластичностью не пригоден для изготовления крепежа методом холодной высадки.

При температуре изотермической выдержки до 550 °С прочность и твердость резко снижаются, а пластичность возрастает. Это объясняется полным распадом до температуры 550 °С переохлажденного аустенита на ферритно-цементитную смесь (сорбит).

Выводы

Наилучшее сочетание механических свойств у калиброванного проката стали марки 40Х достигается после изотермической выдержки при температуре 400 °С. Увеличение температуры изотермической выдержки до температуры 500 °С приводит к значительному повышению прочности и резкому снижению пластичности. При повышении температуры изотермической выдержки до 550 °С прочность и твердость проката резко снижаются, а пластичность возрастает.

Для подготовки калиброванного проката из стали 40Х под холодную высадку высокопрочного крепежа можно рекомендовать изотермическую закалку взамен сфероидизирующего отжига и исключить операцию окончательной закалки крепежных изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пудов Е.А.** Пути улучшения качества проката стали 20Г2Р для холодной объемной штамповки // Производство проката. 2001. № 3. С. 17–19.

Алексей Александрович Филиппов, инженер;
Герман Васильевич Пачурин, д-р техн. наук

УДК 666.798.2

Б.В. Фокин *(Тутаевский филиал Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева)*

Фрактография и прочность керамики на основе нитрида кремния

Предложена классификация изломов образцов из нитридкремниевых материалов. Разработана методика отбраковки заготовок, не отвечающих требованиям по результатам фрактографических исследований изломов.

Classification of fracture samples made from silicon nitride materials is offered. The method of blanks rejection unavailable by results of fractography researches of fracture was developed.

Материалы на основе нитрида кремния отличаются высокой прочностью при комнатной и при температурах до 1500 °С, небольшой плотностью, высокой жаростойкостью. Однако разброс прочностных характеристик, сложность механической обработки препятствуют их широкому применению в качестве материалов для создания энергетических, газотурбинных и других тепловых установок современной техники [1, 2]. Поэтому задача прогнозирования и оценки свойств керамики, возможности изготовления из данной заготовки изделия являются актуальными.

Среди физических методов изучения связи механической прочности материала с его составом и структурой особое место отводится исследованию поверхностей разрушения, поскольку излом наиболее четко отражает строение и свойства материала в локальном объеме, в котором протекает процесс разрушения. В ряде случаев эксплуатационных разрушений и повреждений только по излому можно сделать заключение о характере и причинах разрушения или аварии.

Из фрактографии металлов известно, что многие типы изломов, в том числе большинство эксплуатационных, образуются в результате разрушения, протекающего в последовательности: зарождение трещины, субкритическое ее подрастание (благодаря развитию вязкой трещины, усталости, коррозионной усталости, коррозионного растрескивания или водородной хрупкости) и быстрый долом, когда несущая способность оставшегося сечения перестает соответствовать приложенной нагрузке. Также отмечено, что особенности изломов и механизмы разрушения одинаковы для металлов и для неметаллов [3].

Цель исследований – изучение взаимосвязи характера разрушения образцов и рабочих лопаток ГТД из керамики на основе нитрида кремния с добавкой 12...14 % иттрия, изготовленных методом горячего изостатического прессования из различных партий исходного порошка, с прочностью на изгиб и долговечностью лопаток, прошедших отбраковочные испытания и разрушившихся при достижении определенного числа оборотов в минуту.

Прессовки изготовляли из нескольких партий порошка одного синтеза. Из каждой прессовки получали 2...4 заготовки, из которых вырезали образцы. Размеры образцов 5×5×40 мм, параметр шероховатости Ra = = 0,6...0,8 мкм.

Испытания на прочность проводили на разрывной машине Р5 по трех- и четырехточечной схемам нагружения, со скоростью нагружения 2 мм/мин. При трех-

точечном изгибе расстояние между опорами образца составляло 30 мм, при четырехточечном – между внешними опорами – 30 мм, между внутренними – 20 мм.

Детали опор образца выполнены из стали У8, закалены, отхромированы и отполированы. Радиус закругления опор составляет 4 мм.

Исследования характера разрушения осуществляли с помощью светового микроскопа МБС-1 при увеличениях до ×16 и растрового электронного микроскопа Tesla BS-300 при увеличениях до ×2000 с оттенением излома серебром.

Результаты испытаний показали, что среднее значение прочности на изгиб при трехточечной схеме нагружения составляет $\sigma_и$ = 730 МПа; стандартное отклонение S = 170 МПа; коэффициент вариации ν = = 24 %; модуль Вейбулла m = 4,6. При четырехточечном изгибе $\sigma_и$ = 620 МПа; S = 170 МПа; ν = 26 %; m = 5,2.

Большее значение прочности в первом случае может быть связано с тем, что при четырехточечной схеме нагружения под максимальной нагрузкой находится значительный объем образца, заключенный между внутренними опорами системы нагружения. В результате этого возрастает вероятность попадания различных нарушений структуры, включений и других концентраторов напряжений в плоскость разрушения. Как показали фрактографические исследования у 50 % образцов, подвергнутых разрушению при распределенной нагрузке, на поверхности разрушения обнаружены различные включения. Количество образцов с включениями после трехточечного изгиба составляет менее 40 %.

Сравнение средней прочности образцов, изготовленных из различных партий порошка, показало, что от партии к партии она составляет 640...760 МПа при трехточечном изгибе и 610...720 МПа при четырехточечном изгибе. Прочность образцов, вырезанных из разных заготовок одной прессовки, может отличаться более чем в 2 раза. Это можно объяснить либо некачественным смешиванием компонентов шихты и полидисперсностью исходных порошков, либо некачественным проведением реакционного спекания материала и свидетельствует о необходимости испытаний образцов-свидетелей от каждой заготовки, предназначенной для изготовления изделия.

Анализ изломов показал, что на поверхности разрушения остаются характерные следы, которые дают возможность обнаружить расположение очага разрушения, определить направление распространения и вид фронта трещины, различить зону долома. В окрестности очага разрушения, как правило, наблюдается зеркало разрушения – относительно гладкая область поверхности разрушения, ориентация которой наряду с ориентацией зоны докритического роста трещины позволяет определить направление разрушения.

Образцы, подвергнутые трехточечному изгибу, имеют, как правило, одну поверхность разрушения, а

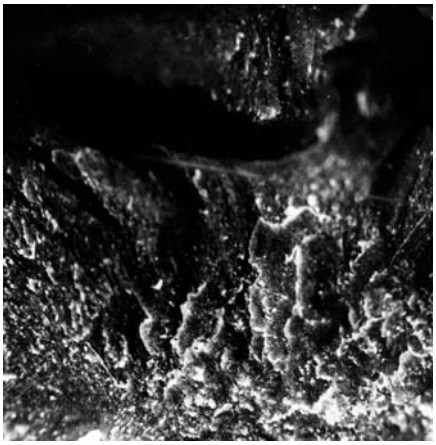


Рис. 1. Излом образца с развитой поверхностью разрушения, оформленной гребнями и рубцами с расщеплениями. В очаге разрушения имеется включение ×16

когда на образец действует распределенная нагрузка, разрушение в большинстве случаев развивается по нескольким поверхностям с образованием крупных и мелких осколков. Осколки образуются со стороны приложения нагрузки.

По характеру поверхности разрушения исследуемые образцы могут быть подразделены на две группы. В первую группу отнесены образцы с развитой поверхностью разрушения, на которой наблюдаются различно ориентированные рубцы, гребни и ступеньки. Они исходят из очага разрушения и формируют зону докритического роста трещины. Эта зона характеризуется наличием расщеплений, свидетельствующих об образовании большого количества микротрещин, слияние которых ведет к образованию разрушающей трещины или трещин, оформляющих зону долома. Зона долома характеризуется гладкой поверхностью разрушения, а ее величина у таких образцов не превышает 50 % площади сечения излома. Средняя прочность образцов первой группы составляет около 760 МПа (рис. 1).

Ко второй группе отнесены образцы, зона докритического роста которых более гладкая или оформлена грубыми рубцами и гребнями. Она практически не содержит расщеплений. Изломы этой группы образцов имеют довольно значительную зону долома (более 60 %). Прочность таких образцов составляет 660 МПа (рис. 2).

Очаг разрушения во всех случаях находится на грани образца, противоположной грани, к которой прикладывается разрушающая сила, т.е. там, где действуют растягивающие напряжения. Если на поверхности или в приповерхностном слое имеется дефект структуры, то он чаще всего и является очагом разрушения. В качестве поверхностного дефекта можно считать угол поперечного сечения образца. Разрушение, развившееся от очага, расположенного в углу сечения, характерно для образцов, подвергнутых трехточечному изгибу. Такие образцы, не имеющие видимых включений, имеют наибольшую прочность (до 1000 МПа).

Электронно-микроскопические исследования показали, что в качестве дефектов, являющихся очагом разрушения, выступают поры, неспекшиеся частицы исходного порошка или инородные включения, что

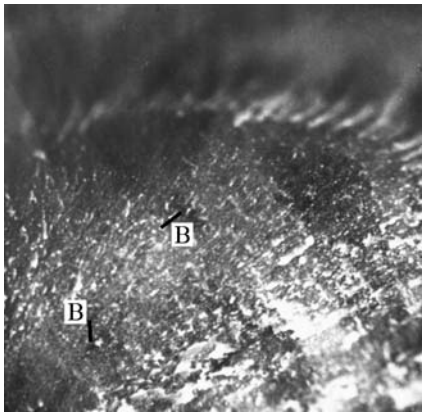


Рис. 2. Излом образца с довольно гладкой поверхностью разрушения с небольшими расщеплениями. В очаге разрушения имеется включение ×16

связано с некачественным смешиванием исходных компонентов шихты (рис. 3, 4). Подобные результаты были получены в работе [4].

Рабочие лопатки в процессе испытаний находились в более сложном напряженном состоянии, чем образцы, подвергнутые изгибу. Однако и в этом случае анализ поверхностей разрушения показал, что представленные изломы можно также условно подразделить на две группы.

К первой группе отнесены изломы с развитой поверхностью разрушения, характеризующейся большим количеством разноориентированных мелких рубцов и ступеней, а также изломы с довольно грубой веерообразной поверхностью разрушения. В данном случае развитие трещины, по-видимому, происходило скачкообразно, в разных плоскостях из очага разрушения. Результатом этого являются веерообразные ступени к зоне долома, состоящей из более грубых разноориентированных ступеней и гребней. Лопатки с подобной поверхностью разрушения выдерживают около 34,7 тыс. об/мин и более (рис. 5).

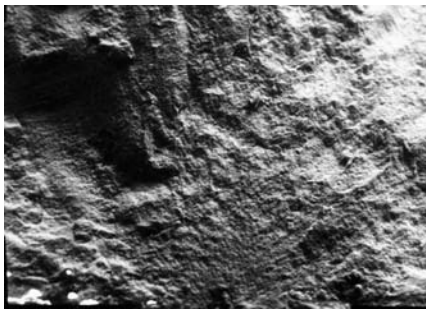


Рис. 3. Очаг разрушения и зеркало излома от приповерхностного включения, ×1000

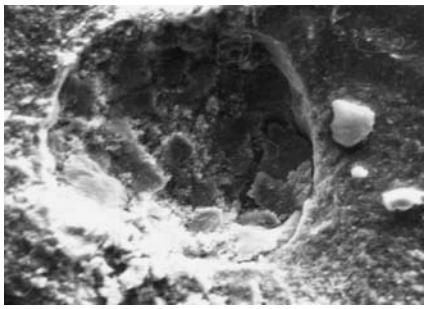


Рис. 4. Очаг разрушения. Пора, внутри видны частицы неспекшегося порошка, ×2000

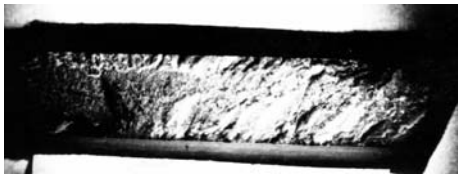


Рис. 5. Излом рабочей лопатки. Разрушение по замку лопатки, довольно развитая поверхность разрушения, оформленная гребнями и ступеньками с расщеплениями. Очаг разрушения от приповерхностного включения, ×16

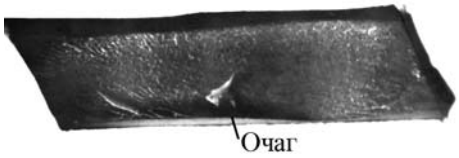


Рис. 6. Излом рабочей лопатки. Разрушение по замку лопатки, довольно гладкий излом, оформленный очень мелкими ступеньками с небольшими расщеплениями. Очаг разрушения находится на поверхности замка, ×16

Ко второй группе отнесены макроизломы с неоднородной поверхностью разрушения, состоящей из двух зон: зоны докритического роста трещины, обладающей небольшой шероховатостью, и зоны долома, состоящей из ориентированно направленных рубцов и ступеней, а также макроизломы с большими, плоскими и довольно гладкими поверхностями разрушения. Разрушение лопаток, обладающих подобным типом излома, наступает при достижении около 31,2 тыс. об/мин (рис. 6).

Таким образом, установлено, что по характеру разрушения изломы образцов и рабочих лопаток из нитридкремниевых материалов можно условно подразделить на две группы; характер разрушения позволяет прогнозировать прочностные и эксплуатационные свойства этих материалов; испытания на изгиб с последующими фрактографическими исследованиями изломов образцов-свидетелей позволят на начальной стадии технологического процесса изготовления рабочих лопаток отбраковать заготовки, не отвечающие прочностным и эксплуатационным требованиям.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Андриевский Р.А., Спивак И.И.** Нитрид кремния и материалы на его основе. М.: Металлургия, 1984. 136 с.

2. **Шаталин А.С.** Особенности керамики как конструкционного материала // Авиационная промышленность. 1990. № 2. С. 46–49.

3. **Фрактография** и атлас фрактограмм: справочник / под ред. М.А. Балтер. М.: Машиностроение, 1987. 272 с.

4. **Андреева М.Г., Бабий О.А., Гогоци Ю.Г. и др.** Структура и свойства горячепрессованных материалов на основе нитрида кремния // Порошковая металлургия. 1991. № 10. С. 36–41.

Борис Викторович Фокин, канд. техн. наук

В.М. Чертов *(Филиал ДонИФЦ, Москва)*

Получение точных заготовок из тонколистовой высокопрочной стали

Приведен опыт использования на практике необычного явления – повышения пластичности в процессе закалки в момент образования высокопрочного хрупкого мартенсита, что позволяет существенно уменьшить коробление листовых заготовок.

The article covers the expirience of practical application of unusual effect – increase of plasticity during quenching with buildup of high-strength brittle martensite. That effect allows to essentially decrease the hogging of sheet blanks.

Сохранение формы стальных листовых заготовок в процессе закалки всегда является трудной задачей. Легированная конструкционная сталь при закалке в воде, масле или иной закалочной среде претерпевает превращения, сопровождающиеся объемными изменениями, термическими и структурными напряжениями и, как следствие, деформацией и короблением изделий.

Особенно это относится к заготовкам из тонколистовой стали толщиной 4...15 мм. Поэтому приходится принимать специальные меры: опускать изделия в закалочный бак в вертикальной плоскости, зажимать их в специальных приспособлениях или проводить закалку под прессом. Даже в этих условиях справиться с короблением изделий удается не всегда, и требуется последующая правка вручную, или под прессом, или в специальных вальцах. Все это усложняет и существенно удорожает производство листовых заготовок, особенно сложной формы, высокой твердости, малой толщины или больших размеров.

Первые работы по практически бездеформационной закалке листовых штамповок сложной формы (спинок кресел летчиков из броневой среднеуглеродистой среднелегированной стали) провели С.Т. Кишкин и Н.М. Скляров в Подольске в 1937 – 1938 гг. [1].

Броневые спинки имели сложную форму, соответствующую форме кресла и спины летчиков. Для повышения их пулестойкости толщину спинок меняли от середины к краям. Изобретенная броневая сталь после закалки обладала высокой прочностью около 2000...2050 МПа. Успешное решение проблемы снижения поводок бронеспинок позволило приступить к изготовлению корпусных деталей самолетов штурмовой авиации из листовых броневых заготовок сложной формы. Максимальное неприлегание заготовок к шаблонам допускалось не более 0,5 мм.

Традиционный способ штамповки нагретой заготовки с немедленной последующей закалкой оказался непригодным из-за недопустимых искажений формы. Закалка в штампах, куда помещались нагретые штамповки, также не дала положительных результатов: после выдачи из штампов обнаруживалась чрезмерная поводка из-за больших остаточных напряжений.

Исполнители интуитивно, основываясь на своем опыте, приняли неожиданное и неординарное решение: производить штамповку заготовки, охлажденной почти до температуры начала закалки – температуры мартенситного превращения. Они первыми обнаружили и использовали эффект пластифицирования стали в момент мартенситного превращения. Повышенная пластичность в момент превращения аустенита в мартенсит позволяла протекать релаксации (снижению) возникающих напряжений. Это и обеспечило минимальные поводки бронеспинок и корпусных деталей. Впервые самолеты-штурмовики конструкции С.А. Ильюшина начали делать с корпусными деталями из высокопрочной стали.

Можно считать, что С.Т. Кишкин и Н.М. Скляров впервые реализовали низкотемпературную термомеханическую обработку стали при температуре закалочной ванны, близкой к температуре начала мартенситного превращения [2]. Следует учесть, что это относится к высокопрочной стали, приобретающей после закалки твердость выше 62 HRC.

Впоследствии Н.М. Скляров признал [3], что исполнители серьезно опасались возникновения чрезмерных закалочных напряжений в хрупкой закаленной высокопрочной стали, что в процессе закалки, совмещенной с правкой, могло привести даже к опасному разлету обломков!

Позднее, в середине XX в., М.Е. Блантер теоретически обосновал проявление аномальной пластичности при аустенитно-мартенситном переходе, а его ученик А.К. Машков практически применил это явление на практике ряда заводов Западной Сибири. Используя эти данные, оказалось возможным разработать

технологию бездеформационной закалки дисков трения из стали марки 30ХГСА.

Заготовки дисков диаметром 350...520 мм вырубались из листа толщиной 4,5...7 мм и традиционно закаливались в масле в свободном состоянии. Деформацию заготовок и плоскости пытались исправлять при среднетемпературном отпуске пакетов на приспособлении в сжатом состоянии. Деформация готовых дисков оставалась настолько большой, что все заготовки – а они при правке пружинили – приходилось долго и с большим трудом править вручную на плите с помощью кувалды. Звон от непрерывных ударов кувалды создавал неприемлемые условия для работающих в цехе.

Изучение опыта других предприятий показало, что на Уралвагонзаводе (г. Нижний Тагил) применяли прогрессивную технологию: создана механизированная линия с нагревом дисков током промышленной частоты и закалкой под прессом. Особенностью процесса является прижатие нагретых дисков под прессом с одновременной подачей закалочного масла.

Отсутствие коробления по плоскости сопровождалось недопустимо высокой деформацией по окружности: до 30 % дисков приобретали форму эллипса, выходящую за пределы припуска на механическую обработку. Это являлось следствием протекания мартенситного превращения под нагрузкой.

Группа технологов родственного предприятия предпочла иное построение технологии [4]. Диски нагревали в полуавтоматической установке током повышенной частоты (8000 Гц) от машинного генератора ВПЧ-100-8000; нагрев вели с одной стороны через кольцевой индуктор. Для равномерного нагрева по окружности предусмотрели вращение диска. Для сквозного равномерного прогрева диска предусмотрено подстуживание – разрыв по времени между окончанием нагрева и подачей закалочного масла.

Масло подавалось под давлением 3...5 МПа в виде душа через многочисленные отверстия в верхней плите штампа. После подачи масла прижатие диска верхним самоустанавливающимся штампом производилось только в момент начала мартенситного превращения, т.е. собственно начала закалки. Время запаздывания определено опытным путем по результатам замера твердости через каждую секунду подачи масла. Общее время подачи масла установлено исходя из времени охлаждения диска до безопасной для прикосновения температуры.

Приведем отработанные режимы закалки дисков: сила пресса 2200 Н; напряжение под нагрузкой 800...550 В; ток возбуждения 3 А; время нагрева для дисков толщиной 7 мм 55 с, толщиной 4,5 мм – 45 с; зазор между индуктором и диском 6...8 мм; передача от индуктора под пресс за 6 с; температура масла 40...80 °С; подача масла до зажатия под прессом через 4...6 с; общее время закалки в масле 50 с.

Коробление по плоскости дисков полностью отсутствовало. При неплоскостности заготовок до термообработки, равной 0,3 мм, неплоскостность после закалки уменьшалась вдвое. Деформация по окружности – незначительна. После такой закалки отпуск проводили на приспособлении без всякой фиксации. Правка дисков как операция была полностью исключена, равно как и применение громоздких приспособлений, фиксирующих сжатые диски при отпуске. Дополнительными преимуществами являлись: отсутствие обезуглероживания поверхности; равномерная и стабильная твердость закаленных и отпущенных дисков; оптимальная микроструктура – мелкоигольчатый отпущенный мартенсит.

Впоследствии министерский разработчик (ЦНИТИ) упростил схему закалки, установив мощный электромагнит в масляной закалочной ванне. В момент начала мартенситного превращения и появления ферромагнетизма диски прижимались к нижней плите с меньшей силой без применения пресса, и таким путем обеспечивалась их бездеформационная закалка.

Заметим, что при приобретении закалочного пресса фирмы "Глиссон" для шестерен диаметром 500 мм [5] было обнаружено аналогичное явление: изготовители пресса применили пульсирующее прижатие верхнего закалочного штампа при подаче масла. Это способствовало снижению деформации шестерен и сохранению биения начальной окружности в пределах, заданных чертежом. Таким образом, в этом прессе тоже было учтено явление аномалии пластичности в процессе мартенситного превращения.

Выводы

Практически подтверждено явление аномальной (повышенной) пластичности легированной конструкционной стали при превращении аустенита в мартенсит. Приоритет этого открытия принадлежит выдающимся российским металловедам XX в. Сергею Тимофеевичу Кишкину и Николаю Митрофановичу Скляpову.

Применение способа закалки тонких листовых заготовок из легированной конструкционной стали, при котором деформация или прессование производится именно в момент проявления достаточной пластичности, позволяет существенно уменьшить коробление и стоимость благодаря исключению правки изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гриневич А.В.** Вклад С.Т. Кишкина в разработку авиационной бронезащиты // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. "Научные идеи С.Т. Кишкина и современное материаловедение". М.: ВИАМ, 2006. С. 175–179.

2. **Шалькевич А.Б., Покровская Н.Г., Орехов Н.Г., Петраков А.Ф.** Высокопрочные конструкционные стали // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. "Научные идеи С.Т. Кишкина и современное материаловедение". М.: ВИАМ, 2006. С. 193.

3. **Скляров Н.М., Каблов Е.Н.** Материалы – Победе! // Полет. 2005. № 5. С. 89–91.

4. **Медник Б.М., Федулеев Ю.А., Чертов В.М.** Высокочастотная бездеформационная закалка деталей // Сб. тр. "Литейное и кузнечное производство". Омск.: ОмГТУ, 1996. С. 16–18.

5. http://zakgear.ru/tech.improving.htm

Владилен Маркович Чертов

Н.И. Давыдов *(ВНИИЛИТМАШ)*

Медно-литейная пластика XIX века
(Краткий экскурс в мир высокого мастерства литейщика)

Ярким представителем художественных ремесел в России служит связанное с Христианством производство медно-литейной пластики – крестов и икон. Как художественные творения эти изделия можно отнести к малым скульптурным формам, отлитым из медных сплавов (пластика – от греческого plastike – ваяние, скульптура). Характерной особенностью таких предметов является композиционная сложность миниатюрных изображений с невысоким рельефом, плавно переходящим от одного уровня сюжетного плана к другому.

Примечательно, что изготовление литых крестов и икон уходит своими корнями к памятникам Византийской культуры. Однако впоследствии в Христианских странах производство подобного вида пластических форм не получило такого распространения и развития, как в России, где дошедшие до наших дней древние и более поздние образцы медного литья отражают многовековую историю русского народа. Каждый период со свойственными ему духовными и художественными традициями накладывал свой отпечаток на пластические формы отливок, которые не теряя своей типичности, изменялись, пополняясь все новыми видами изделий.

Для лучшего понимания сущности этих предметов и знакомства с процессом их изготовления в настоящей статье рассмотрены некоторые духовные аспекты, обусловливающие их специфику, и технологические приемы производства литых крестов и икон в XIX веке.

Сюжеты медно-литейной пластики основаны на канонических образах, поскольку в Христианстве "...изобразительность неразлучна с евангельским повествованием и, наоборот, евангельское повествование – с изобразительностью..." (деяния VII Вселенского Собора, 787 г.). Церковь смотрит на икону (в любом исполнении) как на особую форму отображения Божественной реальности, и на образах (подобно живописным) не допускалось произвольное изложение тем, рожденных воображением мастера. В то же время Церковь не отрицает особенности, связанные с человеческой природой и общеэстетическим восприятием, и при изготовлении медно-литейной пластики допускалось художественное украшение изображений.

Если до XIX века отливки изготовляли главным образом по образцам литых изделий мастеров древней Руси, то в XIX веке кресты и иконы отливали в большинстве случаев с использованием новых по стилистике моделей. Однако, несмотря на свежие веяния в искусстве медной пластики, иконография сюжетов (изображения святых, их одежды, окружающая архитектура и т.п.) была регламентирована богословскими канонами, и развитие композиционной схемы образов осуществлялось за счет художественных приемов, усиливающих эмоциональное восприятие изделий.

Поэтому своеобразие предметов указанного периода заключается в том, что, сохраняя элементы архаизма и используя ранние иконографические изводы (установления канона), они не отличаются строгим стилевым единством, демонстрируя влияние светских художественных идеалов. В оформлении большинства изделий видна склонность к декоративности, сочетание изображения с орнаментом, главным образом с использованием узоров, представляющих собой ритмически чередующиеся растительные или геометрические рисунки с многоцветной эмалью. Причем такое художественное оформление предметов выполняли таким образом, чтобы акцентировать выразительность основной идеи композиции, придать ей особую духовность.

Большой популярностью литые кресты и иконы пользовались у простого народа, органически составляя часть духовной среды, с которой повседневно сталкивался человек. Эти предметы религиозного культа были удобными для переноски; их можно назвать "путными иконами". Их наделяли целительной силой и верили, что они охраняют от всяческих бед. Литые кресты и иконы крепили на воротах при входе в храмы и жилые дома, вывешивали в каютах на судах, использовали для оформления надгробий и др. Другими словами, к литым иконам относились также как и к живописным – с чувством благоговения.

Особое почитание медно-литых крестов и икон было у старообрядцев, считавших данные изделия прошедшими очищение через огонь, не в пример иконам, писанным людьми не "истинной" веры. Этим объясняется тот факт, что основными центрами производства культовых отливок являлись мастерские, организованные старообрядческими общинами.

Надо сказать, что борьба со старообрядчеством на государственном уровне коснулась и медно-литейной пластики, считавшейся одним из атрибутов раскольников. На протяжении XVIII и первой половины XIX веков неоднократно принимались меры против литья предметов Христианского культа вплоть до ликвидации действующих мастерских, а согласно одного из царских указов XVIII века эти изделия "достойной чести весьма лишаются". Однако, несмотря на запреты, потребность в медных крестах и иконах не ослабевала, и многие литейные мастерские, существуя на

нелегальном положении, продолжали их изготовление.

Со второй половины XIX века старообрядчество в результате ряда гражданских реформ в России вышло из подполья, и производство меднолитейной пластики приобрело массовый характер. Причем, благодаря своей дешевизне и долговечности, эти предметы культа составляли серьезную конкуренцию живописным иконам. На ярмарках и в иконных лавках население стало приобретать большое количество металлических икон, причем их низкие цены давали возможность обзаводиться несколькими изделиями с разными сюжетами.

До середины XIX века известный центр производства медно-литейной пластики находился в селе Кодозеро Петрозаводского уезда, где с появлением Выговской старообрядческой общины были организованы мастерские, выпускающие отливки, именуемые искусствоведами "поморским литьем".

В середине XIX века основными регионами, специализирующимися на изготовлении литых крестов и икон, становятся село Большое Красное Костромской губернии, Москва, Урал и Сибирь. Известны и другие литейные промыслы, в частности, по мнению авторов работы [1], Сызранский район Самарской губернии являлся видным производителем медно-литейной пластики, прежде всего, относительно большого ("аналойного") размера; продукция указанного региона характеризовалась тщательной отделкой.

Развитие литейного дела в Москве связывают с Преображенской старообрядческой общиной. Созданные этой общиной Лефортовская и Черкизовская мастерские следовали традициям "поморского литья", их изделия отличались высоким качеством, декоративностью и разноцветьем эмалей. Со второй половины XIX века они стали крупнейшими поставщиками медно-литейной пластики в России.

Привлекательность литья зависит не только от его художественного уровня, но также от мастерства литейщиков и обеспечения производственного процесса соответствующими технологическими приемами.

Технология изготовления медной пластики в XIX веке в основном базируется на вековых традициях художников и литейщиков из народа. Их мастерство передавалось из поколения в поколение, сохраняя преемственность этих традиций. Например, известен письменный "указ о медном мастерстве" [2], составленный поморцами в XVIII веке, которым отчасти руководствовались литейщики XIX века.

Для формирования общего представления о способе литья заслуживает внимания дошедшая до наших дней опись 1858 г. некоторого имущества одной из выговских медно-литейных мастерских: "...найдено: глина сырая вымятая..., в корыте черная земля, употребляемая при вылитии створов и крестов, четыре железных опоки, употребляемые при вылитии вышеозначенных вещей, ..., два меха маленькие и один большой, шесть досок с углублениями для чистки выливаемых створов...". Указанный документ свидетельствует о том, что литье осуществляли в песчаную форму.

Собрав и проанализировав имеющуюся информацию о производственном процессе, технологию изготовления медно-литых изделий можно представить следующим образом.

Модель сначала изготовляли из дерева, используя наиболее пригодные для этой цели породы (например, липу или ясень). Причем в качестве образца часто служили литые иконы более раннего периода их производства. По деревянному прототипу отливали модель из меди или сплава на медной основе. Такое решение обусловлено тем, что металлическая модель лишена известных недостатков, присущих деревянным – недолговечности и склонности к изменению формы и размеров в зависимости от температуры и влажности окружающей среды.

При изготовлении литой оснастки ее качество, по существу, зависело от мастерства формовщика и гравировщика. Причем на гравировщика ложилась особая ответственность, так как порой ему приходилось восстанавливать рельеф нечетко отпечатавшихся участков рисунка.

Поскольку изготовление деревянной модели связано с выполнением сложного типа художественной резьбы ("плоскорельефной", изобилующей мелкими элементами), можно представить, что некоторые модели вырезали непосредственно на металлических пластинах.

Практиковали использование составных моделей. Например, при производстве четырехстворчатых складней с "Двунадесятыми праздниками" применяли сборную конструкцию, состоящую из отдельных "Праздничных" икон, вставленных вместе с изображениями с килевидным обрамлением в рамку-модель.

Изготовляли также сборные композиции, включающие отдельные иконы, модели которых при формовке устанавливали вместе (без зазоров), и по полученному отпечатку получали единую отливку из элементов, часто сюжетно не связанных друг с другом. Такие построения иногда выполняли с нарушением эстетического равновесия в пропорциях изделия в целом.

Таким образом, задача создания модели была непростой, поскольку для этого необходим высокий уровень художественного и исполнительского мастерства при соблюдении установленных каноном требований.

Для изготовления формовочной смеси использовали "землю" – кварцевый песок, которую отмучивали, отделяя примеси, сушили, затем обжигали "до красна" и просеивали через сито. Полученный таким образом песок смешивали со связующими, в качестве которых служили глина и квас "свежий добрый". Эту смесь выдерживали до двух суток, после чего при необходимости добавляли еще некоторое количество кваса.

Использовали также "жирный" мелкий песок с высоким содержанием глины. Его смешивали с "тощим" песком и увлажняли водой и квасом.

Смесь считали готовой, если при ее сжатии в руке на образующемся комке оставался отчетливый след рисунка ладони. Пользуясь таким методом оценки, получали смесь достаточно пластичную, обеспечивающую формирование рельефного отпечатка всех элементов модели.

Формы обычно изготовляли в металлических опоках. На поверхность модели сначала наносили разделительное покрытие, а затем смесь, просеянную через "мелкое" сито.

В качестве разделительного покрытия на модель наносили ("припыливали") споры гриба-дождевика. Иногда с этой целью применяли песок, счищенный щетками с отливок и просеянный через тонкое сито (другими словами, прокаленную кварцевую пыль).

К процессу формовки относились с большой ответственностью и некоторые вопросы, обусловливающие качество поверхности отливок, решали при изготовлении самой формы. Равномерное уплотнение смеси являлось большим искусством, поскольку при отсутствии соответствующего умения "набьешь один бок, может и хорошо получиться, а с другой непременно замоешь – и никакой на ней чеканки не видать...", – рассуждали мастера.

Не менее важным считалось умение аккуратно разнять форму, осторожно извлечь модель, и затем исправить дефекты на поверхности формы, т.е. "в песке подчеканить".

Готовые формы сушили, уделяя большое внимание степени их нагрева. Даже незначительно перегретую форму ("огнепальную") считали не пригодной для дальнейшего использования.

Пригар на отливках не допускали, и мастера отмечали, что если "с умом сделаешь – получится отливка без пригара, а пристанет песок, работы считай, не было". Чтобы избежать пригара, форму перед заливкой нужно "хорошо припылить". О применении припыла говорится в вышеупомянутом указе о "медном мастерстве": "форму положи да пыхвой напыхай на всякие штуки, токмо чтоб немного, да ситом насей...", что означало припыливание спорами гриба-дождевика, просеянными через сито. В данном случае следует обратить внимание на использование спор гриба не только в качестве разделительного материала для оснастки, но и как противопригарное средство.

Припылом служил также тонкомолотый древесный уголь из лиственных пород (березовый или ольховый). Вместо припыла поверхность отпечатка иногда коптили, сжигая бересту.

Для нанесения припыла (а также разделительного покрытия) обычно использовали "полотняный мешочек". Такое приспособление позволяло в процессе распыления материала осуществлять его тонкое просеивание.

Иногда для достижения лучшего сцепления припыла со смесью в форму снова закладывали модель (если это технологически было возможно), и с ее помощью прижимали к поверхности слой нанесенного порошка.

Хотелось бы отметить, что глядя на отливки со сложнейшими изображениями и отмечая при этом высокую четкость отпечатка, невольно склоняешься к мысли об использовании в этих случаях способа литья по восковым (выплавляемым) моделям. Однако еще раз стоит подчеркнуть, что старыми мастерами такое качество достигалось с помощью песчаной смеси, соответствующей главному их требованию – обеспечению "отпечатка с ладони". Наглядным примером весьма сложного рельефа, полученного при литье в песчаные формы, может служить оборотная сторона креста, показанная на рис. 2 (см. 3-ю полосу обложки).

Основным сплавом, который применяли при изготовлении металлических моделей, крестов и икон, являлась латунь с содержанием цинка 33...36 %. Однако встречались изделия из бронзы, и, по-видимому, это было связано с наличием сплава в мастерской. Выбор указанных сплавов, помимо их хорошей жидкотекучести, коррозионной стойкости, а также зрительной привлекательности, можно связать еще и с тем, что на Руси, согласно Библии, меди (как металлу) издревле приписывали свойства оберега.

Полученные отливки очищали медными щетками, оборотную сторону и торцевые поверхности обрабатывали рашпилем или шлифовали. При необходимости отдельные детали рисунка и надписи доводили с помощью резцов и чеканов.

После обработки на некоторые отливки в углубления накладывали эмаль, затем эти отливки обжигали на углях, "чтобы не было огня и дыма". Чаще всего использовали темно-синюю эмаль в сочетании с голубой и белой. Но встречаются великолепные образцы изделий с полихромной эмалью трех и более цветов (черного, темно-синего, голубого, желтого, зеленого, белого и др.). Значительные декоративные возможности эмали и, прежде всего, ее стойкие, не тускнеющие со временем краски, являлись украшением литых крестов и икон, придавая им изысканность.

Иногда встречаются отливки со следами дефектов, чаще всего недоливов – порок, выраженный в отсутствии части отливки, обычно в местах, наиболее удаленных от питателей, где металл из-за недостатка теплоты терял текучесть и полностью не заполнял полость формы. Указанный дефект был наиболее характерен при изготовлении предметов большого размера, а также особо тонкостенных изделий. Следует обратить внимание на тот факт, что в подобных случаях практиковали "ремонт" отливок, хотя более простым решением являлось изготовление их заново.

Ремонт заключался в "напаивании" на отсутствующие участки предметов вставок, которые с лицевой стороны гравировали под общий рисунок изделия. Данная обработка сложна, но ее выполняли на таком

высоком художественно-технологическом уровне, что порой зрительно не видны эти участки. Судя по характеру таких работ, можно предположить, что мастера относились к производству литых крестов и икон как к священнодействию, испытывая чувство благоговения, т.е. они предпочитали "ремонт", а не ликвидацию дефектных предметов духовного содержания.

В XIX веке среди выпускаемых отливок наиболее распространенными были восьмиконечные кресты – "Распятие Христово" – с орудиями страстей ("копием и тростью с губкой"). Под крестом изображали череп Адама в знак искупления грехов человеческих распятием Христа (рис. 1, см. 3-ю полосу обложки). Эти кресты изготовляли разных размеров и назначения (наперсные, напрестольные, выносные). Их формы были простыми и с изображениями "Предстоящих".

Выпускали компилятивные сложные композиции, включающие 16 клейм с сюжетами Праздников, расположенных вокруг "Распятия Христова" с "Предстоящими", а также клейма с изображениями избранных икон. Наверху обрамлением композиции являются херувимы. Такие отливки в просторечии называли "лопатами". Подобные композиции выпускали меньших размеров и с меньшим количеством клейм (рис. 3, см. 3-ю полосу обложки).

Нередко оборотную сторону крестов украшали орнаментом, например растительным (см. рис. 1) или оформляли, отливая текст молитвы и изображение "Голгофского креста".

Сюжеты литых икон XIX века, их иконографический извод были выверены веками. Их изготовляли с изображениями Спасителя, Чудотворных икон Богоматери, Святителя Николая Чудотворца, Преподобного Сергия Радонежского, Великомученницы Параскевы, Великомученника Пантелеимона. Были популярны сюжеты "Троица Ветхозаветная", "Чудо Георгия о змие", "Чудо Дмитрия Солунского", "Огненное восхождение пророка Илии" и др.

Складни в основном служили как походные (путные) иконы для путешествующих. Их выпускали разных размеров с четырьмя (полиптих), тремя (триптих) и двумя (диптих) створами.

Четырехчастные складни имеют прямоугольные створки одного размера с килевидным верхом. На трех створках клейма с изображениями главных "Двунадесятых" Праздников, на четвертой – с поклонениями образам Богоматери. Иногда в отливках можно встретить некоторые отличия, в частности, вместо композиции "Сошествие Святого Духа на апостолов" икону "Троица Ветхозаветная".

Трехстворчатые иконы (рис. 9, см. 3-ю полосу обложки) выпускали большого и малого размеров с разной сюжетной композицией, среди которых наиболее распространены "Двунадесятые праздники" и "Деисус". "Деисус" – это изображения Иисуса Христа в центре и обращенных к нему по сторонам Богоматери и Иоанна Крестителя (рис. 9), что воплощает заступничество святых за людей перед Спасителем. Встречаются складни "Деисус" с избранными святыми.

Значительный раздел трехстворчатых композиций представляют собой предметы, у которых величина боковых створок составляет половину размера центрального пласта с рельефом иконы. На этих створках обычно находятся клейма с избранными Праздниками, или поясные изображения некоторых святых.

Двухстворчатые складни часто изготовляли с клеймами икон "Троица Ветхозаветная" и "Богоматерь Знамение". Складни небольших размеров носили как тельные иконы. Такой тип икон напоминает створчатые панагии древней Руси.

На оборотной стороне складней, независимо от числа створок, обычно отливали "Голгофский крест" в обрамлении сложного орнамента, представляющего собой стилизацию архитектурных форм и растительных мотивов.

Оценивая социально-духовные специфику производства медно-литейной пластики, по мнению автора, эти предметы неповторимы в условиях нашего времени (если не иметь в виду формальное копирование), поскольку мастера прошлого были целостными натурами, чтившими Христа; их творения соответствовали духу эпохи, а искусство отличалось чистотой стиля. Современный человек под влиянием окружающей его действительности, как правило, в душе весьма противоречив, и его творения невольно носят отпечаток грубых черт натурализма, как результат эстетических, идейных и прочих преобразований нашего времени.

Следует обратить внимание на то, что попытки создать "слепки" – коммерческие копии с отдельных предметов, используя современные технические средства, неудачны, поскольку получаемые при этом изделия являются типичными "новоделами", не соответствующими духу своей эпохи по целому ряду признаков, хорошо известных в среде специалистов и коллекционеров.

В двадцатые годы XX века производство медно-литейной пластики по известным причинам было повсеместно прекращено. Большое количество изделий безвозвратно утеряно – уничтожено (утилизировано как цветной металл) либо вывезено за границу. В то же время многие предметы, дошедшие до наших дней, имеют, к сожалению, сильно тертую поверхность, и это главным образом обусловлено тем, что среди обладателей крестов и икон бытовал обычай перед Престольными праздниками их чистить до блеска абразивными материалами, чаще всего кварцевым песком.

Несмотря на связанные с разными обстоятельствами значительные утраты предметов медно-литейной пластики, еще можно встретить прекрасно сохранившиеся образцы изделий. Знакомясь с ними, мы как бы совершаем путешествие в прошлое, в мир народного промысла – художественного литья, поражающего своим особым духовным содержанием; эти предметы

нельзя рассматривать лишь с точки зрения экспозиционной важности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кириков А.А., Бережков В.Н.** Антология православного художественного литья. М.: Книжное издание А.А. Кирикова, 2004. (Неизвестная коллекция. Том 2. Кресты).

2. **Фролова Г.И.** К вопросу о выговском медно-литейном производстве, скитские литейщики середины XIX века // Русское медное литье: сб. Вып. 1. М.: Сол систем, 1993. С. 76–80.

Николай Иванович Давыдов

Рецензия на книгу Ю.И. Головина
ВВЕДЕНИЕ В НАНОТЕХНИКУ

Книга представляет собой обзор современного состояния нанотехнологии (НТ) и революционных преимуществ и качеств нанопродуктов в самых разных сферах деятельности человека – от промышленного производства до здравоохранения, от защиты окружающей среды до космонавтики и национальной безопасности. При этом НТ представлена не как сумма некоторых технологических приемов и операций по изготовлению тех или иных предметов пользования, а как новая парадигма создания искусственной среды обитания, более комфортной, более дружественной человеку, несущая радикальные преобразования в образе его жизни.

В книге впервые систематически излагаются как принципы, так и существующие или разрабатываемые в настоящее время практические приложения нанотехники во всех основных направлениях ее развития: материаловедении, электронике, приборостроении, системотехнике, информатике, биотехнологии, медицине и др. Использованы зарубежные и отечественные источники информации и самая современная литература (включая ссылки на публикации 2005–2006 гг. в специализированной периодической печати). Даны определения и расшифровка ключевых понятий, терминология приводится параллельно на русском и английском языках, что облегчает понимание происхождения и смысла основных положений НТ. Для чтения книги не требуется специальной предварительной подготовки в области НТ. Вся информация, необходимая для понимания материала, содержится во вводных разделах и пунктах.

Акцентируется внимание на том, что НТ позволяет не только радикально улучшать характеристики традиционных изделий, но и генерировать принципиально новые подходы, создавать искусственную среду нового поколения в быту, на производстве, в сфере обороны, досуга, развлечений и т.п., совершенно неосуществимую в рамках предыдущей технологической парадигмы.

Из прогнозов авторитетнейших организаций, специалистов и экспертов следует, что при существующих темпах роста рынков нанопродукции (30…50% в год) их суммарный объем превзойдет рынки электроники, автомобилестроения, черной металлургии уже через 8–10 лет.

Наряду с научными и инженерно-техническими рассмотрены также и социально-экономические аспекты инновационных приближений к решению наиболее актуальных глобальных проблем: сохранение мира, улучшение качества жизни, ресурсо- и энергосбережение. Обращается внимание не только на преимущества, но и на скрытые угрозы бесконтрольного развития НТ и отставания в этой области.

Книга хорошо иллюстрирована специально подготовленными рисунками, схемами, диаграммами и графиками, что облегчает восприятие материала. Она написана живым, неказенным языком с привлечением разнообразных ассоциаций, комментариев и цитат.

Книгу можно приобрести в ОАО "Издательство "Машиностроение" за наличный и безналичный расчет. Объем книги 496 стр. Цена 495 р. с НДС

Телефоны: (495) 269-66-00, 269-52-98, 268-69-00
Факс: (495) 269-48-97
e-mail: realiz@mashin.ru

НП "СПП"

Некоммерческое партнерство
"Союз профессиональных паяльщиков
им. С.Н. Лоцманова"

109383, Москва, ул. Полбина, 45

Тел. (985) 1394069
Факс (495) 354-3424
www.paika.ru

К созданию некоммерческого партнерства "Союз профессиональных паяльщиков" им. С.Н. Лоцманова

Пайка материалов как самостоятельная область науки и техники окончательно сформировалась к 70-м годам прошлого века и продолжает бурно развиваться в настоящее время как наука, находящаяся на стыке различных областей знаний, таких как физическая химия, материаловедение, металлургия, химия и т.д.

В 2006 г., в год столетнего юбилея С.Н. Лоцманова – основателя Советской и Российской школы пайки в начале мая в Москве было проведено учредительное собрание, на котором присутствовали ведущие специалисты страны в области пайки и было учреждено Некоммерческое партнерство "Союз профессиональных паяльщиков" им. С.Н. Лоцманова (НП "СПП").

В качестве учредителей выступили представители производителей материалов для пайки – ЗАО "АЛАРМ" и ООО "МИФИ-АМЕТО". Активное участие в создании НП "СПП" приняли два университета Тольяттинский Государственный (ТГУ) и РГТУ "МАТИ", в которых проводится подготовка специалистов в этой области, а также около 40 квалифицированных специалистов.

Основными задачами НП "СПП" являются:

1. Объединение усилий ученых и специалистов, работающих в области пайки на ее развитие. Систематизация теоретических и экспериментальных исследований, а также богатого практического приложения пайки в различных областях техники.

2. Способствование сохранению и преумножению прошлого научного наследия, воспитанию нового поколения специалистов-паяльщиков, расширению и совершенствованию образовательной системы, процесса подготовки молодых специалистов по пайке во втузах страны.

3. Создание экспериментальной базовой лаборатории, оснащение ее современным оборудованием для обучения студентов и проведения исследовательских работ.

4. Инициирование, постановка, координация и планирование актуальных теоретических (в том числе фундаментальных) и прикладных исследований в области пайки. Участие в выполнении Федеральной целевой программы "Национальная технологическая база".

5. Планирование и решение вопросов стандартизации в области пайки.

6. Популяризация достижений в области пайки, проведение семинаров, конференций с опубликованием докладов. Организация периодического издания, отражающего передовой опыт в области пайки, других смежных технологических процессов и деятельность НП "СПП".

7. Устранение научно-технической изоляции России в области пайки, что позволит стране быть полноправным членом мирового научного сообщества.

В качестве органа управления выбран Совет партнерства, включающий 16 представителей 8 комитетов по отраслевому признаку.

Генеральным директором партнерства избран Игорь Николаевич Пашков.

Лица и организации заинтересованные в продвижении передовых технологий, материалов, оборудования, развития и распространения способов пайки в стране приглашаются к сотрудничеству.

В настоящее время НП "СПП" имеет в наличии "Справочник по пайке" под редакцией И.Е. Петрунина (М.: Машиностроение, 480 с.) и готов реализовать его заинтересованным предприятиям и частным лицам в необходимых количествах.

Ордена Трудового Красного Знамени ОАО "Издательство **"Машиностроение"**,
107076, Москва, Стромынский пер., 4/1, стр. 3
Учредитель ООО "Издательство Машиностроение – 1".
E-mail: zpm@mashin.ru
Телефоны редакции журнала: (495) 268-47-19, 268-36-54, 268-69-19. **http://www.mashin.ru**
Дизайнер *Погорелова Т.Н.* Технический редактор *Тупталов С.Ю.* Корректоры *Сажина Л.И., Сонюшкина Л.Е.*
Сдано в набор 27.07.07 г. Подписано в печать 14.09.07 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 8,21. Заказ 149. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ОАО "Издательство "Машиностроение".
Отпечатано в ООО "Подольская Периодика". 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, д. 15.