ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(Кузнечно-прессовое, литейное и другие производства)

№ 7 июль 2015

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

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

Зам. Главного редактора
СЕРИКОВА Е.А.

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

Ответственный за подготовку и выпуск номера
СЕРИКОВА Е.А.

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

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

Тел.: (499) 268-47-19, 269-54-96
Факс: (499) 269 48 97
Http: //www.mashin.ru
E-mail: zpm@mashin.ru, zpmpost@rambler.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Литейное и сварочное производства

Коробова Н.В., Аксененко А.Ю., Шевченко С.Ю., Петров А.Ю., Лузгин В.И., Фризен В.Э. Комплекс на базе турбоиндукционного оборудования в технологии производства заготовок из композиционных материалов с алюминиевой матрицей методами тиксолитья . . . 3

Котелкин А.В., Звонков А.Д., Сосенушкин Е.Н., Матвеев Д.Б., Роберов И.Г., Лютцау А.В. Оценка технического состояния сварных соединений по уровню остаточных напряжений . . . 10

Кузнечно-штамповочное производство

Коробова Н.В., Дмитриев А.М., Толмачев Н.С., Аксененко А.Ю. Исследование высокоплотных порошковых цилиндрических заготовок, сформованных на специализированных гидравлических прессах . . . 15

Прусаков М.А. Глубокая вытяжка тонкостенной полусферы пуансонами с различным профилем . . . 20

Дмитриев А.М., Коробова Н.В., Толмачев Н.С. Производство корпусных деталей выдавливанием, совмещенным с раздачей стенки, на специализированных гидравлических прессах . . . 24

Колотов Ю.В., Кобелев А.Г., Чашкин Д.С. Усовершенствование конструкции ударной массы штамповочного молота . . . 27

Коробова Н.В., Аксененко А.Ю. Исследование операции комбинированного выдавливания в "плавающей" матрице детали типа стакан с наружным полым стержнем . . . 32

Прокатно-волочильное производство

Емельянов В.В., Сосенушкин Е.Н. Технические требования и режимы прокатки биметаллических листов для изготовления из них изделий способом ротационной вытяжки . . . 39

Материаловедение и новые материалы

Коробова Н.В., Аксененко А.Ю., Лузгин В.И., Фризен В.Э., Шевченко С.Ю. Эволюция микроструктуры литейных алюминиевых сплавов при гидродинамическом воздействии электромагнитных полей на расплав . . . 43

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

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

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

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Заготовительные производства в машиностроении", 2015

SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

BLANKING PRODUCTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

(Forging and stamping, foundry and other productions)

№ 7 July 2015

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

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

Editorial Assistant
SERIKOVA E.A.

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

This issue prepared with assistance of specialist
SERIKOVA E.A.

An advertiser is responsible for the promotional materials

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

Ph.: (499) 268-47-19, 269-54-96
Fax: (499) 269-48-97
Http: //www.mashin.ru
E-mail: zpm@mashin.ru, zpmpost@rambler.ru

CONTENTS

Foundry and Welding Productions

Korobova N.V., Aksenenko A.Yu., Shevchenko S.Yu., Petrov A.Yu., Luzgin V.I., Frizen V.E. Complex based on turbo-induction equipment for production of blanks from metal-matrix composites by thixocasting 3
Kotelkin A.V., Zvonkov A.D., Sosenushkin E.N., Matveev D.B., Roberov I.G., Lyuttsau A.V. Technical state estimation of weld-in connections by residual stresses level 10

Forging and Stamping Production

Korobova N.V., Dmitriev A.M., Tolmachev N.S., Aksenenko A.Yu. Study of high-density powder cylindrical workpieces formed on specialized hydraulic presses 15
Prusakov M.A. Deep drawing of thin-walled hemisphere using punches with different profile . . 20
Dmitriev A.M., Korobova N.V., Tolmachev N.S. Production of hollow cylindrical parts by extrusion combined with distribution wall on specialized hydraulic press 24
Kolotov Yu.V., Kobelev A.G., Chashkin D.S. Improvement of construction of shock mass of swage 27
Korobova N.V., Aksenenko A.Yu. Research of combined extrusion of part such as cup with outer hollow rod in “sliding” die 32

Rolling and Drawing Production

Emel’yanov V.V., Sosenushkin E.N. Specifications and rolling patterns of bimetal sheets for manufacturing of products by rotary drawing 39

Physical Metallurgy and New Materials

Korobova N.V., Aksenenko A.Yu., Luzgin V.I., Frizen V.E., Shevchenko S.Yu. Evolution of casting aluminium alloys microstructure under hydrodynamic effect of electromagnetic fields on melt 43

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

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

© "Innovative Mashinostroenie Publishers", "Blanking productions in mechanical engineering", 2015

УДК 621.777

Н.В. Коробова, А.Ю. Аксененко, С.Ю. Шевченко
(Московский государственный технологический университет "Станкин"),
А.Ю. Петров *(ООО "РЭЛТЕК", г. Екатеринбург),*
В.И. Лузгин, В.Э. Фризен *(Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург)*

Комплекс на базе турбоиндукционного оборудования в технологии производства заготовок из композиционных материалов с алюминиевой матрицей методами тиксолитья

Приведен обзор разработанного опытного образца плавильно-заливочного формующего комплекса для производства изделий из композиционных материалов методом тиксолитья. В комплексе применено турбоиндукционное оборудование оригинальной конструкции. Использованные конструктивные и технологические приемы позволили решить проблему изготовления изделий из металломатричных композиционных материалов методом тиксолитья в современном заготовительном производстве.

Ключевые слова: турбоиндукционная печь; электромагнитное перемешивание; тиксолитье; металломатричные композиционные материалы.

Article describes experimental plant of melting-casting-forming for production of parts from composites by thixocasting. In complex is applied turbo-induction equipment of original design. Using the new design and technology method is solved the problem of production of parts from metal matrix composites by thixocsating in modern blanking production.

Keywords: turbo-induction furnace; electromagnetic stirring; thixocasting; metal matrix composites.

Процесс активного технического перевооружения предприятий оборонно-промышленного, машиностроительного, аэрокосмического сегментов промышленности Российской Федерации в условиях сложившейся конъюнктуры формирует возможности выхода отечественных предприятий на качественно новый уровень, а также способствует активному развитию заводов и компаний, занимающихся выпуском литейного, кузнечно-прессового, механообрабатывающего, автоматизирующего и прочих видов производственного оборудования, обладающего высоким потенциалом внедрения инновационных технологий [1, 2]. Ключом к дальнейшему развитию науки и техники, имевших стагнационный период в постсоветские годы, является тесное сотрудничество высших учебных заведений, научных институтов и компаний, активно ведущих научно-исследовательскую деятельность наряду с выпуском наукоемкой продукции [3].

Возрастающие требования к прочности, жесткости, износостойкости и технологичности продукции обусловливают интенсификацию исследований по разработке новых материалов, технологий их получения и обработки, а также технологического оборудования [4, 5]. В то же время немаловажным фактором является экономическая целесообразность внедрения техпроцессов заготовительного производства, позволяющих получать детали и полуфабрикаты, точные по форме и размерам, с минимальной долей финишной обработки из различных материалов [6, 7]. Особое место среди перспективных материалов занимают металломатричные композиционные материалы, обладающие уникальным набором свойств и качеств [7].

Для обеспечения потребностей российских предприятий в технологическом оборудовании, позволяющем изготовлять методами тиксолитья детали из композиционных материалов на

основе металлической матрицы в МГТУ "Станкин" по результатам выполнения научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы (НИОКР) был создан плавильно-заливочный формующий комплекс на базе турбоиндукционных печей для получения фасонных отливок из композиционных материалов методом тиксолитья (Комплекс). НИОКР проводилась в рамках федеральной целевой программы "Национальная технологическая база" на 2007—2011 годы по подпрограмме "Развитие отечественного станкостроения и инструментальной промышленности" на 2011—2016 годы.

Метод тиксолитья, как и другие методы формообразования заготовок в твердожидком состоянии, основан на эффекте тиксотропности, возникающем при нахождении расплава в двухфазном состоянии (SSM-технологии) [8]. Процесс тиксолитья предполагает ступенчатое управление ростом кристаллов при формировании кристаллического строения фасонного изделия, осуществляемое на нано- и микроуровнях, и принципиальное изменение условий течения металла при формообразовании.

Преимуществами данного метода формообразования являются: возможность получения сложных изделий, имеющих тонкие стенки и развитую пространственную геометрию; сниженная пористость и повышенная прочность изделий; стабильность и однородность свойств в фасонных заготовках; улучшенная технологичность.

Использование приемов, когда металл находится в полутвердом состоянии, применяют не только при формировании деталей из алюминиевых сплавов, но и при приготовлении композиционных смесей, состоящих из алюминиевых сплавов и дискретных армирующих частиц (рис. 1) [8].

Значительный вклад в развитие технологий формообразования методами тиксолитья, тиксоштамповки, получения композиционных сплавов на основе алюминиевых сплавов и жидкой штамповки был сделан учеными МГТУ им. Н.Э. Баумана, МГТУ "Станкин", ВИЛС, ВНИИМЕТМАШ и др.

Технологический процесс можно разделить на три этапа: 1 — получение заготовки с требуемой структурой; 2 — нагрев заготовки до требуемого содержания твердой фазы; 3 — формообразование.

На этапе получения заготовки с требуемой структурой необходимо обеспечить зародышеобразование с максимальным числом центров фазового превращения, равномерно распределенных по объему слитка. Следовательно, важной задачей является подавление дендритных форм роста зародышей. На практике это осуществляется механическим или электромагнитным воздействием на затвердевающую среду, регулированием охлаждения и конвективным перемешиванием расплава.

Среди многих способов, обеспечивающих данный эффект, наиболее рациональным явля-

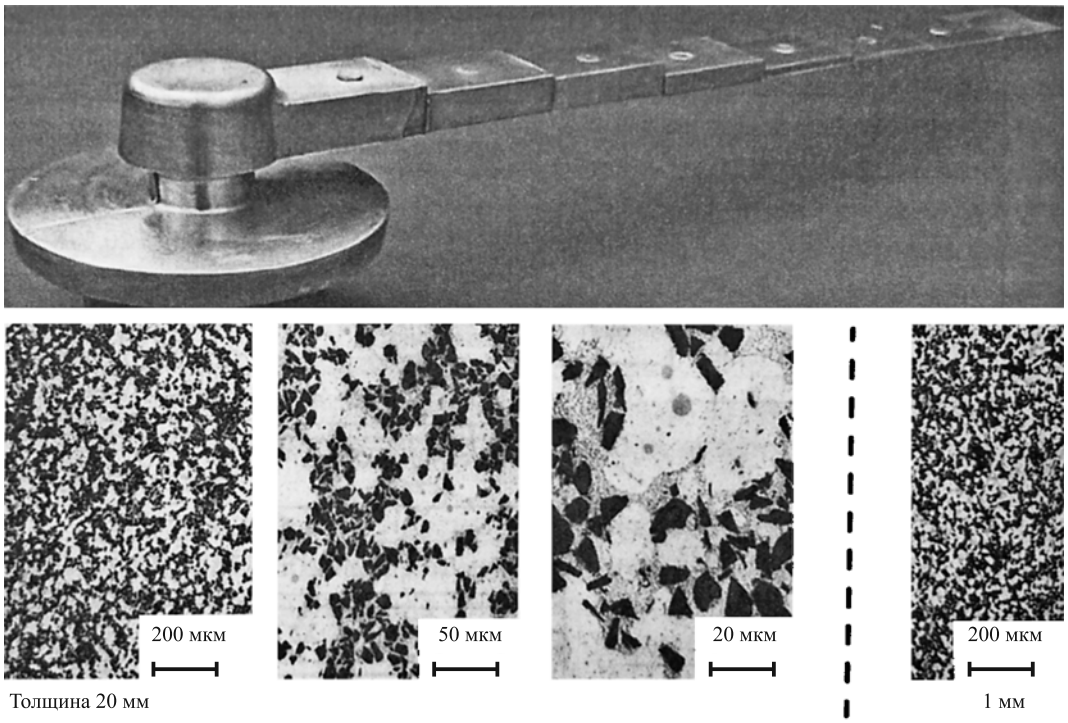


Рис. 1. Внешний вид и микроструктура отливки из композиционного материала А357 + 20 % SiC, полученной методом тиксолитья [8]

ется метод полунепрерывного литья с магнитогидродинамическим перемешиванием расплава в кристаллизаторе [9, 10]. Для приготовления расплава перед разливкой и полунепрерывного литья слитков из композиционных материалов эффективным является использование турбоиндукционных агрегатов в качестве плавильной печи и кристаллизатора с магнитогидродинамическим перемешиванием металла в зоне фронта кристаллизации. Применение данного оборудования обеспечивает широкие технологические возможности для получения слитков из композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов за счет тепловых и гидродинамических эффектов, возникающих в расплаве под действием электромагнитного поля.

Полученные результаты экспериментов позволили выработать концепцию получения слитков с равномерной глобулярной структурой из композиционного материала методом электромагнитного перемешивания (ЭМП) при кристаллизации, с введением армирующих тугоплавких частиц. Целью введения частиц является инициирование дополнительных центров кристаллизации равномерно распределенных в объеме получаемого слитка. Наложение электромагнитного перемешивания при кристаллизации обеспечивает термостабилизацию слитка, распределение частиц в объеме и препятствует образованию дендритных ветвей. Полученный предложенным способом слиток из композиционного материала обладает улучшенным комплексом механических характеристик, структурой с равноосными зернами α-фазы заданного размера, а также гарантированной технологичностью при формовании в твердожидком состоянии [9].

Совместно с ООО "РЭЛТЕК" (г. Екатеринбург) и УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина была разработана *установка плавильно-заливочная турбоиндукционная* (УПЗТ) для получения слитков с тиксотропной структурой. Принципиальная схема установки (рис. 2) защищена патентом на полезную модель.

УПЗТ представляет собой модульный плавильно-литейный комплекс, который можно использовать для получения прутковых тиксозаготовок и отливок методами гравитационного литья. УПЗТ состоит из турбоиндукционной тигельной печи *1*, тигля *2*, снаружи которого установлены греющий индуктор *3*, магнитопроводы *4* и вращающий индуктор *5*.

Печь *1* выполнена с огнеупорным днищем *6*. В крышке *7* тигельной печи *1* выполнены: устройство *8* для подачи и ввода в расплав легирующих материалов, через которое осуществляют подачу и ввод в расплав легирующих и модифицирующих материалов *9*, форсунки *10* для создания защитной атмосферы.

УПЗТ также содержит кристаллизатор *11*, состоящий из тепловой насадки *12*, механизма *13* вытяжки слитка и магнитогидродинамического перемешивателя *14* с индуктором *15*. Над кристаллизатором *11* через тепловую надставку *16* установлен металлоприемник *17* с индуктором 18, устройством *19* управляемого донного слива со стопором *20* и крышкой *21*, в которой установлены форсунки *22* для подачи инертного газа и технологическое отверстие *23* для установки устройства *19* управляемого донного слива.

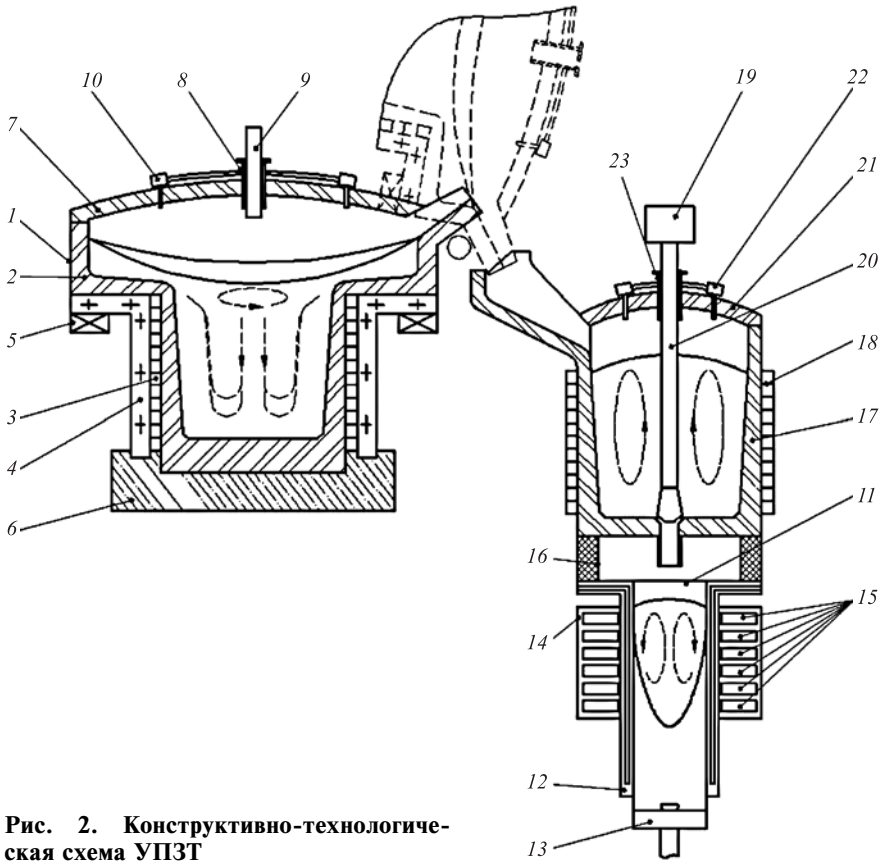


Рис. 2. Конструктивно-технологическая схема УПЗТ

Печь *1* загружается шихтой при открытой крышке *7*, далее подается защитный газ для предотвращения окисления металла. После наплавления металла в тигле *2* печи *1* подается ток низкой частоты во вращающий индуктор *5*. Расплав вращается вокруг оси тигля *2* и циркулирует в зоне нижней части индуктора *3* вдоль оси и стенок тигля *2*. На поверхности металла под действием центробежных сил формируется лунка, в которой образуется шлак. На этапе технологической обработки через устройство *8* подаются легирующие и модифицирующие материалы *9*, которые в результате диффузии в турбулентном слое

скольжения под шлаком взаимодействуют с металлом и проникают в ванну расплава.

После приготовления порции композиционного сплава тигель *2* турбоиндукионной печи *1* поворачивается примерно на 100°, обеспечивая при этом перелив металла в металлоприемник *17*. Затем подается ток промышленной частоты в подогревающий индуктор *18* и индуктор *15* магнитогидродинамического перемешивателя *14*, после достижения требуемых параметров поднимается стопор *20* устройства *19* управляемого донного слива. Металл попадает в кристаллизатор *11*, и начинается процесс вытяжки слитка механизмом *13*.

Над фронтом затвердевания циркулирует аксиальный поток металла под действием бегущего электромагнитного поля магнитогидродинамического перемешивателя *14*. Во время вытяжки слитка осуществляются подогрев и перемешивание расплава в металлоприемнике *17* электромагнитным полем индуктора *18*. Одновременно с началом вытяжки слитка тигель *2* турбоиндукционной печи *1* возвращается в исходное положение, загружается шихтой и начинает следующий цикл плавки. При этом процессы плавки и вытяжки слитка совмещены во времени, что позволяет увеличить производительность, снизить производственные затраты и повысить качество изготовления слитков из композиционных сплавов.

Турбоиндукционная тигельная печь (ТИТП) является основным агрегатом УПЗТ, решающим задачи по плавлению металла-матрицы и допирования расплава упрочняющими микрочастицами и распределению их по всему объему ванны с достаточной однородностью.

На рис. 3 приведен эскиз 3D-модели конструкции турбоиндукционной тигельной печи, разработанной ООО "РЭЛТЕК" совместно с УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.

На рис. 4 показан изготовленный опытно-промышленный образец ТИТП.

Предлагаемая конструкция ТИТП обеспечивает одноконтурное тороидальное движение металла вследствие многофазного электропитания токами средней частоты основного греющего индуктора и вращательное движение металла (в горизонтальной плоскости) вокруг оси под действием бегущего поля низкой частоты, создаваемого круговым линейным двигателем, установленного в верхней части тигля печи. При вращении на поверхности расплава образуется вогнутый мениск (воронка), что облегчает ввод материалов и обеспечивает высокую скорость диффузии за счет турбулентного скольжения металла в подшлаковом слое.

ТИТП с двухплоскостным перемешиванием расплава позволяет устранить химическую неоднородность и обеспечить равномерность распределения в нем вводимых дисперсных частиц. Также в ТИТП обеспечивается изотермическая выдержка металла в интервале кристаллизации, что дает ей неоспоримые преимущества по сравнению с другими методами литья.

Для получения слитков круглого сечения с заданной структурой методом полунепрерывного литья в УПЗТ применяют кристаллизатор с электромагнитным перемешивателем.

С учетом того, что нежелательные особенности макро- и микроструктуры возникают из-за неравномерности распределения температурных полей по объему слитка, а также в результате постепенного изменения химического состава жидкой ванны в процессе кристаллизации и недостаточной подпитки кристаллизующихся участков расплавом, применение различных физических воздействий, создающих движение расплава, должно оптимизировать структуру и снизить число дефектов.

Электромагнитное перемешивание обеспечивает следующие основные виды воздействий на кристаллизующийся расплав:

— непосредственно перемешивание расплава, управляющее теплоотводом при кристаллизации;

— формирование поверхности слитков (формообразование слитков);

— уменьшение или увеличение силы тяжести за счет электромагнитных сил, так называемые левитационные эффекты;

— регулирование движения расплава в широком диапазоне скоростей, обеспечивающее формирование глобулярной структуры.

При электромагнитном перемешивании в жидком расплаве возникают силы, приводящие к циркуляции жидкости в замкнутом объеме. Направление движения расплава, а также скорость можно регулировать в широких пре-

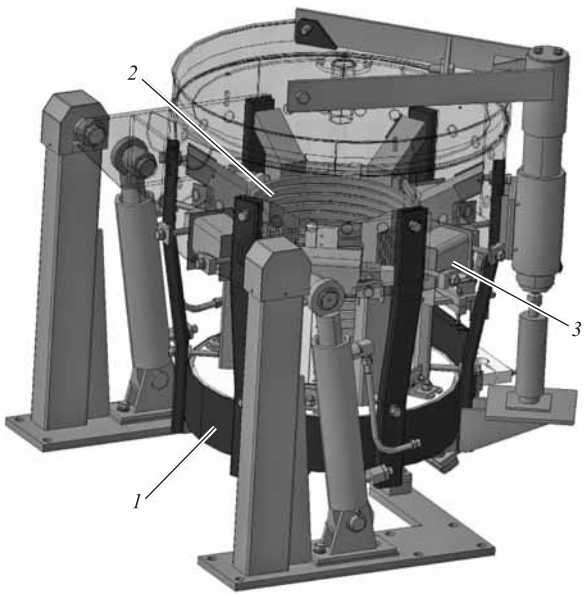


Рис. 3. 3D-эскиз турбоиндукционной тигельной печи:
1 — каркас печи; *2* — вращающий индуктор; *3* — греющий индуктор

Рис. 4. Опытно-промышленный образец ТИТП

делах, создавая как совпадающие направления движения с тепловой конвекцией, так и несовпадающие.

Турбулентное течение, возникающее при электромагнитном премешивании у фронта кристаллизации, увеличивает эффективный коэффициент тепловой проводимости на три порядка, а коэффициент диффузии — на шесть порядков, что приводит к выравниванию температур и химического состава во всем объеме жидкой фазы, увеличению ее общего переохлаждения.

Кристаллизатор с электромагнитным перемешивателем включает в себя машину полунепрерывного литья с кристаллизатором скольжения, оборудованным устройством электромагнитного перемешивания жидкой фазы слитка для управления процессом формирования его структуры [9]. Общий вид индуктора перемешивателя показан на рис. 5. При питании трехфазной системой токов индуктор создает в металле бегущее вдоль оси магнитное поле, что порождает осевую циркуляцию расплава в лунке кристаллизующегося металла.

В проеме индуктора электромагнитного перемешивателя установлен кристаллизатор скольжения (рис. 6).

Экспериментальные исследования слитков, полученных с применением опытного образца кристаллизатора с электромагнитным перемешивателем, показали существенное влияние на размер α-фазы и увеличение степени глобулярности. Исследования позволили определить наиболее значимые технологические факторы, имеющие влияние на размер зерна, фактор формы и морфологию глобул в объеме [7, 9].

3D-модель опытно-промышленного образца УПЗТ, изготовленного ООО "РЭЛТЕК", приведена на рис. 7. Взаимное расположение печи и машины полунепрерывного литья на платформе позволяет компактно расположить установку на участке цеха в одном пролете. Преобразователи частоты, блоки конденсаторов и системы охлаждения расположены под платформой, на которой установлены ТИТП, металлоприемник, тара для шихтовых материалов и кабина оператора установки.

Полученные на УПЗТ слитки можно использовать как для реализации, так и для дальнейшей обработки на следующем этапе технологии. Предварительно нарезанные заготовки поступают на участок тиксолитья (участок). На этом участке происходит формование в твердожидком состоянии.

Участок, также выполненный с использованием модульного принципа, представляет собой завершенную производственную ячейку, основными операциями которой являются второй и третий технологические этапы тиксолитья: повторный нагрев заготовки до однородного твердожидкого состояния и последующее формообразование. Цель нагрева — получение равномерного по объему заготовки градиента температуры в пределах между линиями солидуса и ликвидуса. От точности нагрева и градиента температур зависит содержание твердой фазы, а следовательно, и технологичность заготовки при формоизменении [7].

Нагрев осуществляют в *установке индукционного прецизионного нагрева* (УИПН), разработанной также ООО "РЭЛТЕК". Режимы нагрева и температура варьируются в зависимости от используемого материала и технологии формообразования. Выравнивание температурного поля достигается за счет термовыдержки при изменении мощности индуктора по заданному закону.

По достижении заданной температуры заготовка с помощью робота манипулятора, оснащенного устройством для перемещения заготовок в твердожидком состоянии, помещается в формоизменяющий агрегат, где происходят процесс заполнения формы суспензией и выдержка для кристаллизации.

Компоновка участка формообразования методом тиксолитья представлена на рис. 8. В качестве формоизменяющего оборудования применяют *машину литья под давлением* (МЛПД) с модернизированным узлом прессования либо кузнечно-прессовое оборудование, обеспечива-

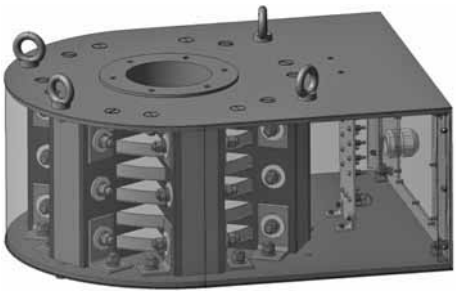


Рис. 5. Индуктор перемешивателя жидкой фазы слитка при кристаллизации

Рис. 6. Кристаллизатор скольжения

ющее требуемые соотношения силовых, кинематических и временных показателей, например, гидроколенный пресс. После кристаллизации отливка/штамповка извлекается и передается на дальнейшую обработку.

Функциональные возможности комплекса: получение фасонного литья из цветных сплавов; получение композиционных материалов на базе алюминиевых сплавов путем введения модифицирующих компонентов на стадии плавления или разливки; получение цилиндрических заготовок с тиксотропной структурой из композиционных материалов на базе алюминиевых сплавов; прецизионный нагрев мерных заготовок из алюминиевых сплавов до твердожидкого состояния; получение деталей сложной формы методами тиксолитья и/или тиксоштамповки из заготовок в твердожидком состоянии.

Технические характеристики Комплекса

Сила запирания пресс-формы, кН	6300
Ход подвижной плиты, мм	630
Толщина пресс-формы, мм:	
максимальная	850
минимальная	380
Максимальная масса фасонной отливки, кг	40
Сила прессования, кН	670
Сила гидровыталкивателя, кН	256
Камера МЛПД	Холодная
Размеры плит (длина × высота), мм	1200×1200
Вместимость печи по алюминию, кг.	50
Мощность преобразователя частоты, кВт	100
Частота тока греющего индуктора, кГц	1
Частота тока вращающего индуктора, Гц	20...70
Производительность установки, кг/ч (для опытно-промышленного образца УПЗТ)	50
Рабочий диапазон температур расплава в печи, °С	От 500 до 1000
Частота тока индуктора, Гц	40...80
Диаметр пресс-слитков, мм	100...120
Мощность установки прецизионного нагрева, кВт (при средней частоте)	63
Частота тока в индукторах, Гц	1000
Число зон нагрева опытного образца УИПН	1
Точность нагрева в области температуры солидуса, °С	±3
Гарантированное распределение температуры по сечению заготовки, °С	±3

Заключение. Разработанный Комплекс позволяет изготовлять детали сложной формы высокоэффективными методами тиксолитья не только из алюминиевых сплавов, но и композиционных материалов на их основе. Широкие металлургические возможности производства заготовок, не имеющих аналогов на российском рынке, в сочетании с реализуемыми технологиями твердожидкой штамповки изделий высокой точности делают данный Комплекс уникальным оборудованием российского производства.

Предложенная конструкция УПЗТ обеспечивает требуемые технологические параметры получаемых слитков по однородности химического состава и по их структуре.

Благодаря особенностям конструкции и возможности гибко управлять процессами плавки и перемешивания, УПЗТ позволяет изготовлять ши-

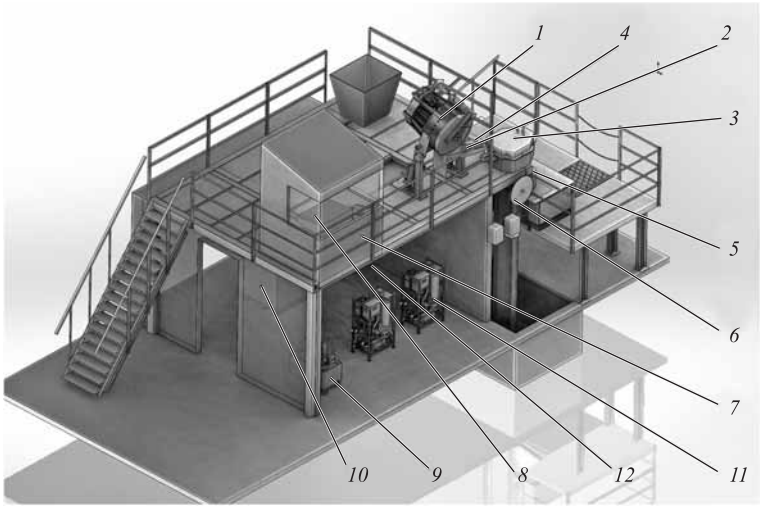


Рис. 7. 3D-модель установки плавильно-заливочной турбоиндукционной:

1 — турбоиндукционная тигельная печь; *2* — желоб разливочный; *3* — металлоприемник; *4* — пульт управления кристаллизатором с ЭМП; *5* — кристаллизатор с ЭМП; *6* — механизм вытяжки слитка; *7* — кабина оператора участка плавки; *8* — пульт управления печью и разливкой; *9* — гидропривод; *10* — полупроводниковый преобразователь частоты; *11* — станции охлаждения; *12* — батарея конденсаторов

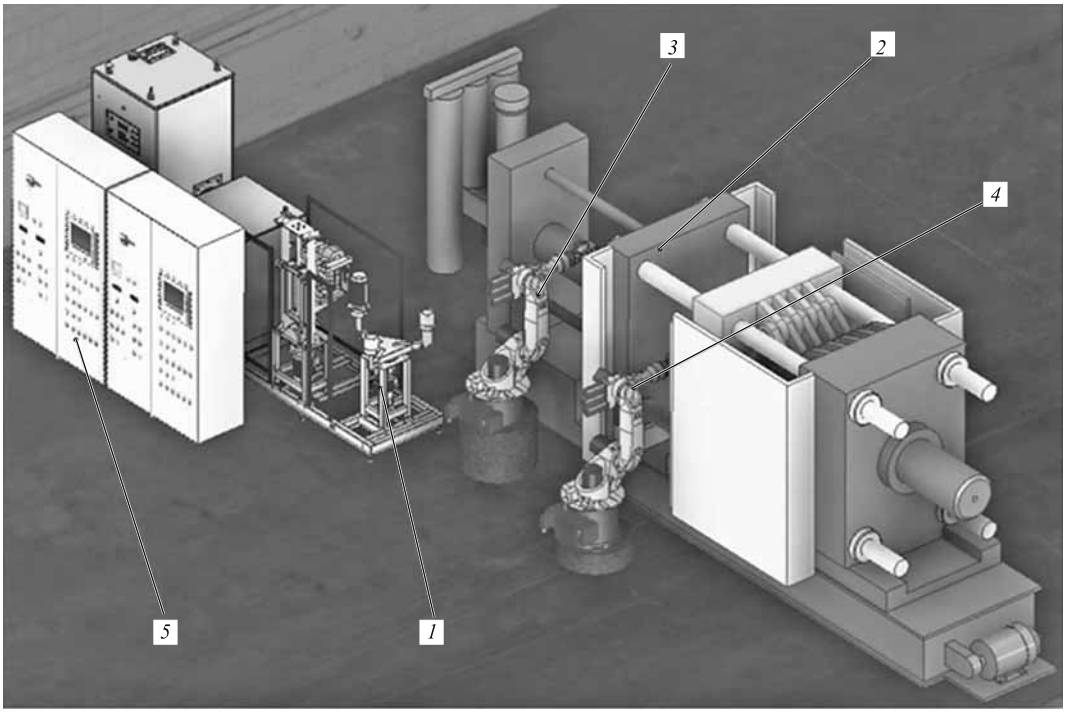


Рис. 8. 3D-модель участка формообразования на базе МЛПД:

1 — УИПН; *2* — МЛПД; *3* — манипулятор для загрузки заготовок в нагреватель/перемещения твердожидкой заготовки в формоизменяющий агрегат; *4* — манипулятор для извлечения отливок и смазки пресс-форм; *5* — шкафы электрооборудования и системы управления

рокую номенклатуру слитков из аллюмоматричных композиционных материалов. Это обеспечивает повышение эффективности заготовительного производства и улучшение качества продукции, производимой из композиционных сплавов методами реолитья, тиксолитья, тиксоформовки и др.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Григорьев С.Н.** Перспективы развития единого федерального инжинирингового центра в области станкостроения на базе МГТУ "СТАНКИН" и ОАО "СТАНКОПРОМ" //Вестник МГТУ "Станкин". 2014. № 1 (28). С. 8—12.

2. **Григорьев С.Н.** Тенденции и проблемы модернизации машиностроительного производства на базе отечественного станкостроения // Вестник МГТУ "Станкин". 2010. № 3. С. 7—13.

3. **Григорьев С.Н.** Роль технических вузов в инновационном развитии промышленности // Вестник МГТУ "Станкин". 2009. № 3. С. 5—7.

4. **Дмитриев А.М., Коробова Н.В., Толмачев Н.С.** Экспериментальная проверка результатов компьютерного моделирования напряжений на элементе деформирующего инструмента // Вестник МГТУ "Станкин". 2014. № 2 (29). С. 44—49.

5. **Создание** рациональной преимущественной ориентировки зерен в формованных со сдвигами слоев порошковых заготовках / А.М. Дмитриев, Ф.В. Гречников, Н.В. Коробова, А.Ю. Аксененко // Вестник МГТУ "Станкин". 2015. № 1 (32). С. 13—20.

6. **Дмитриев А.М., Коробова Н.В., Петров М.Д.** Разработка технологии производства корпуса гидроцилиндра из железного порошка // Вестник МГТУ "Станкин". 2014. № 1 (28). С. 54—58.

7. **Коробова Н.В., Аксененко А.Ю., Тарасов Ф.Е. и др.** Об электромагнитном воздействии на расплав алюминия при его модифицировании // Металлургия машиностроения. 2013. № 1. С. 8—11.

8. **Семенов Б.И., Куштаров К.М.** Производство изделий из металла в твердожидком состоянии. Новые промышленные технологии: учеб. пособие. М.: Из-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 223 с.

9. **Аксененко А.Ю., Климов В.Н., Коробова Н.В. и др.** Влияние электромагнитного перемешивания при кристаллизации на структуру тиксозаготовок из литейных алюминиевых сплавов // Металловедение и термическая обработка металлов. 2013. № 12 (702). С. 30—33.

10. **Практическое** использование изменения механических характеристик конструкционных углеродистых сталей при холодной объемной штамповке / А.М. Дмитриев, Ф.В. Гречников, Н.В. Коробова, Н.С. Толмачев // Вестник МГТУ "Станкин". 2014. № 4 (31). С. 41—44.

Наталья Васильевна Коробова, д-р техн. наук,
mt-6@yandex.ru;
Анатолий Юрьевич Аксененко;
Светлана Юрьевна Шевченко, канд. техн. наук;
Александр Юрьевич Петров, канд. техн. наук;
Владислав Игоревич Лузгин, канд. техн. наук;
Василий Эдуардович Фризен

УДК 620.179.152.1:539.319

А.В. Котелкин, А.Д. Звонков, Е.Н. Сосенушкин*, Д.Б. Матвеев, И.Г. Роберов, А.В. Лютцау**

(ФГУП "Научно-исследовательский институт стандартизации и унификации", г. Москва,
** Московский государственный технологический университет "Станкин",*
*** Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС")*

Оценка технического состояния сварных соединений по уровню остаточных напряжений

Рассмотрены примеры технической диагностики различных объектов, которая способствует раннему обнаружению дефектов и различного рода неисправностей и позволяет в процессе технического обслуживания устранить возможные отказы, что повышает надежность и эффективность эксплуатации, а также оценивать техническое состояние ответственных деталей в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: сварные соединения; зона термического влияния; неразрушающий контроль; остаточные напряжения; дифрактометр.

Examples of technical diagnostics of various objects which aides incipient failure and various trouble detection are considered and allows permits to reduce possible technical rejections. This increases the efficiency and reliability of service and also gives opportunity to evaluate the condition of essential parts by their technical state during operation.

Keywords: welded joints; heat-affected zone; nondestructive test; residual stresses; diffractometer.

Повышение требований к эксплуатационной надежности деталей, узлов и агрегатов, входящих составными частями в различные конструкции, предполагает масштабную модернизацию предприятий машиностроительного комплекса [1, 2]. Причем оснащению высокоэффективным оборудованием должны подвергаться все этапы технологического передела и, прежде всего, металлургическая промышленность, заготовительные производства и металлообработка.

От выплавки металлов со стабильным химическим составом зависит получение исходных материалов с заданными механическими характеристиками [3]. Заготовительные производства машиностроительного комплекса обеспечивают металлообрабатывающие предприятия заготовками требуемой формы [4, 5], структурного состояния [6], с набором характеристик металла, необходимых для качественного изготовления ответственных деталей.

Немаловажную роль играют процессы упрочняющей обработки: термической и химико-термической, поверхностной механической, а также создание высокопрочных покрытий на рабочих поверхностях ответственных деталей.

Производство крупногабаритных изделий или изделий сложной геометрии не обходится без сварных соединений [7]. От качества сварных швов и примыкающих к ним зон термического влияния также зависит эксплуатационная надежность конструкций в целом.

Необходимы контроль качества и диагностика не только изготовленных деталей, но и инструмента на разных этапах обработки от заготовительных до финишных операций. Это связано с неизбежным износом инструмента, обусловленным адгезией [8], малоцикловой усталостной и термомеханической прочностью, что негативно влияет на точностные параметры и шероховатость создаваемых поверхностей. Кроме того, в диагностике нуждается многочисленное технологическое оборудование, используемое на разных этапах производства деталей.

Процесс сварки элементов металлических конструкций характеризуется возникновением в области шва и прилегающей к ней зоне больших остаточных напряжений, что обусловлено следующими факторами: усадкой металла шва в процессе кристаллизации, неравномерностью распределения температуры в зоне сварки (так называемой зоне термического влияния), структурными изменениями и жесткостью свариваемого изделия. Уровень этих напряжений может достигать значений предела текучести, а в некоторых случаях и превышать его, вызывая нежелательные пластические деформации и даже разрушение материала [7].

В статье приведены результаты оценки технического состояния разных сварных соединений по уровню остаточных напряжений на стадиях их изготовления, ремонта и эксплуатации. Данные об уровне остаточных напряжений получены с использованием портативного рентгеновского дифрактометра ДРП [9].

На Волжском трубном заводе проведена оценка напряженного состояния в зоне термического влияния прямошовной сварной трубы (рис. 1). Расположение зон на расстоянии от сварного шва: 2; 10; 25 и 50 мм.

Дифрактометр ДРП реализует метод $\sin^2\psi$, обеспечивающий определение упругих напряжений в требуемом направлении. В каждой из выбранных зон поверхности указанных труб в окрестности сварных швов определили остаточные напряжения в тангенциальном направлении (σ_θ). Результаты усредняющей оценки распреде-

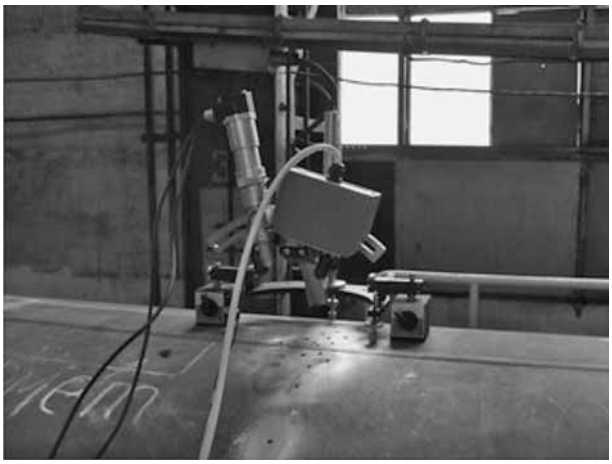


Рис. 1. Контроль прямошовной сварной трубы с использованием портативного рентгеновского дифрактометра ДРП

1. Распределение средних остаточных напряжений на поверхности сварных труб в зоне термического влияния

Расстояние от шва, мм	σ_θ, МПа
3	−40
10	−30
25	+125
50	+10

ления σ_θ в зоне термического влияния приведены в табл. 1. Здесь и далее знак "−" соответствует сжатию, знак "+" — растяжению.

Полученные результаты свидетельствуют о распределении остаточных напряжений в зоне термического влияния по одному из типичных вариантов, когда сжимающие остаточные напряжения возле шва по мере удаления от последнего переходят в значительные растягивающие.

В условиях ВНИИАЭС (г. Москва) проведена оценка напряженного состояния фрагмента сварного соединения из аустенитной стали в шве и зоне термического влияния (рис. 2). Используемый метод — метод $\sin^2\psi$.

Распределение остаточных напряжений представлено на рис. 3, где зона 0 — середина шва, зоны 1 и 6 находятся на расстоянии от середины шва x = 9 мм, зоны 2 и 7 — на расстоянии 24 мм, зоны 3 и 8 — на расстоянии 45 мм, зоны 4 и 9 — на расстоянии 60 мм, зоны 5 и 10 — на расстоянии 24 мм, зоны 6 и 11 — на расстоянии 97 мм. В нижней части рис. 3 приведены значения остаточных напряжений в сварном шве и рядом с ним на расстоянии менее 9 мм. Эти данные получены при использовании в дифрактометре ДРП поликапиллярной коллимационной системы диаметром 0,5 мм.

Как и в первом примере, полученные результаты свидетельствуют о классическом распределении остаточных напряжений в зоне термического влияния с наличием участка с растягивающими напряжениями.

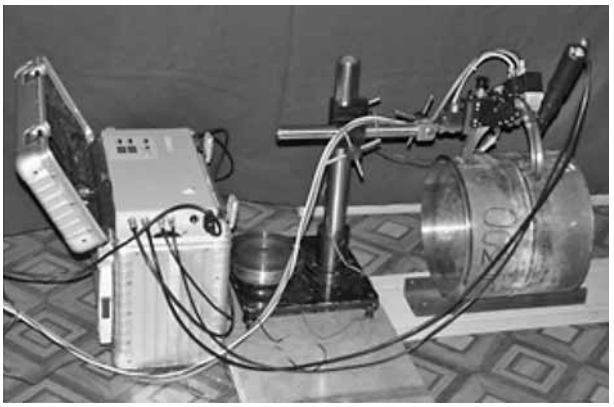


Рис. 2. Измерение фрагмента сварного соединения из аустенитной стали

В РКК "Энергия" проведена оценка напряженного состояния в полусферах детали спутника связи из титанового сплава на разных стадиях их изготовления: до вварки фланцев, после вварки фланцев и после термической обработки. Зоны контроля — между отверстиями, под фланцами, по периметру отверстий и на расстоянии 5...8 мм от них и на вавариваемых фланцах. Используемый метод — метод вертикальной съемки, обеспечивающий определение суммы поверхностных главных напряжений, равной первому инварианту тензора напряжений, в условиях характерного для поверхности изделий плосконапряженного состояния.

В качестве показателя напряженного состояния выбрано среднее по всем измеряемым зонам значение суммы главных напряжений (далее —

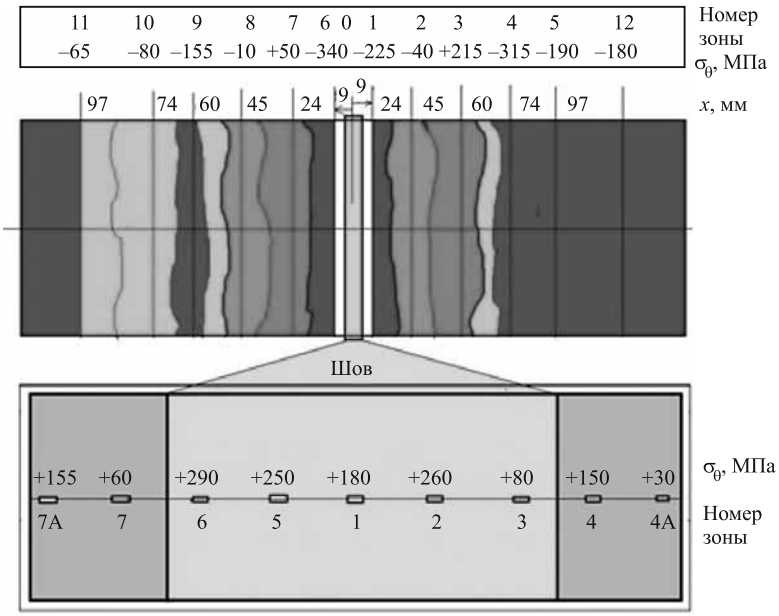


Рис. 3. Напряженное состояние сварного соединения из аустенитной стали в зоне термического влияния и сварном шве

среднее напряжение). Оценка стабильности каждой технологической операции проведена по стандартному отклонению среднего напряжения. Если до вварки фланцев среднее напряжение составило −97 МПа, то после вварки фланцев отмечены смена его знака и значительный рост: до +665 МПа, а после термической обработки — снижение уровня растягивающих напряжений почти в 5 раз: до +138 МПа.

С точки зрения разброса величины возникающих остаточных напряжений самой стабильной операцией является термическая обработка (минимальное стандартное отклонение составило 87 МПа), а самой нестабильной — вварка фланцев (стандартное отклонение среднего напряжения составило 177 МПа).

В условиях стояночной площадки ОАО "Быковский авиаремонтный завод" определено напряженное состояние в зоне термического влияния поперечного сварного шва в области дна новой пустой цистерны автозаправщика АТЗ-20 вместимостью 20 м^3, изготовленной из алюминиевого сплава, и при ее заполнении. Используемый метод — метод вертикальной съемки рентгеновского максимума.

До заполнения цистерны среднее напряжение составило −110 МПа, его стандартное отклонение 20 МПа; после заполнения соответственно среднее напряжение −55 МПа, а его стандартное отклонение 90 МПа. Следовательно, действующее при заполнении цистерны автозаправщика среднее напряжение равно +45 МПа, что близко к расчетному напряжению.

В условиях Нововоронежской атомной электростанции проведена оценка влияния стадий ремонта горячего коллектора-патрубка на уровень остаточных напряжений в зоне термического влияния в осевом (σ_z) и тангенциальном (σ_θ) направлениях. Используемый метод — метод $\sin^2\psi$.

Результаты, приведенные в табл. 2, позволяют проследить влияние стадий ремонта на уровень остаточных напряжений в поверхности горячего коллектора-патрубка.

Если до ремонта в зоне термического влияния сварного соединения действуют растягивающие осевые средние остаточные напряжения, то после ремонта — сжимающие. Для средних тангенциальных остаточных напряжений отмечено последовательное снижение уровня растягивающих напряжений на каждой стадии ремонта до минимального значения. Следовательно, после ремонта зона термического влияния находится в относительно благоприятном напряженном состоянии.

2. Уровень средних остаточных напряжений в зоне термического влияния по стадиям ремонта

Стадия ремонта	σ_z, МПа	σ_θ, МПа
До сварки	235	305
После сварки	116	147
После высокого отпуска	−205	60

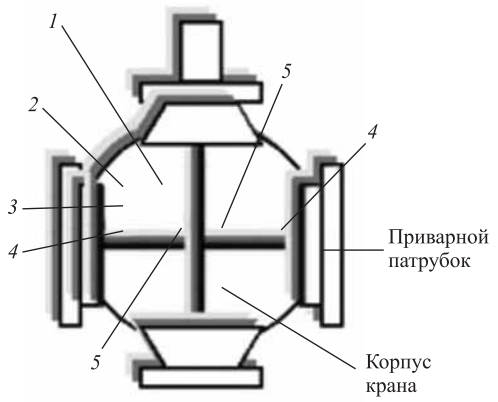


Рис. 4. Зоны контроля отремонтированного крана

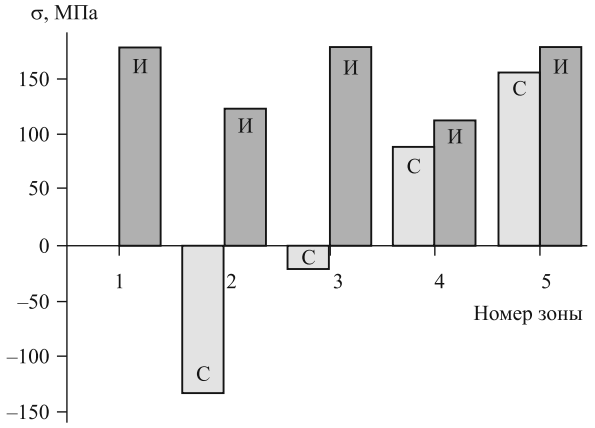


Рис. 5. Гистограммы уровня напряжений в контролируемых зонах крана после сварки (С) и во время испытаний внутренним давлением 7,5 МПа (75 атм) (И)

На машиностроительном заводе проведен контроль остаточных напряжений корпуса крана ДУ-700 фирмы "Борзиг" (Германия) из стали 17Г1С после ремонта и во время испытаний под давлением. Области контроля — зоны термического влияния показаны на рис. 4. Используемый метод — метод вертикальной съемки рентгеновского максимума. Результаты представлены на рис. 5.

Полученный неравномерный характер распределения остаточных напряжений после сварки в задаваемых формой крана характерных направлениях (чередование зон сжатия и зон растяжения) является вероятной причиной искажения геометрических размеров корпуса и приварных патрубков при ремонте (см. рис. 5). В процессе испытания крана внутренним давлением 7,5 МПа (75 атм) снижается разброс данных по полученной сумме остаточных и действующих напряжений со знаком "+", т.е. растяжением.

Оценка технического состояния по уровню остаточных напряжений при эксплуатации сварного соединения может быть проведена в соответствии с методикой определения эксплуатационного ресурса, изложенной в российском патенте № 2215280.

Методика оценки остаточного ресурса состоит в следующем. Измерения с использованием портативного рентгеновского дифрактометра проводят за два контрольных этапа, разнесенных по времени эксплуатации, и на каждом этапе определяют остаточные напряжения σ_1 и σ_2. После второго контрольного этапа выбирают зону, где изменение остаточных напряжений максимально: $\Delta\sigma_{max} = \sigma_{2max} - \sigma_1$, и вычисляют максимальную экспериментально полученную скорость $v_{эmax}$ изменения остаточных напряжений за период наработки, определяемый временным или другим показателем N:

$$v_{эmax} = (\sigma_{2max} - \sigma_1)/N.$$

Проектную скорость изменения остаточных напряжений $v_п$ определяют как отношение предельно допустимого уровня остаточных напряжений $[\Delta\sigma]$ к проектному ресурсу $P_п$:

$$v_п = [\Delta\sigma]/P_п.$$

При этом

$$[\Delta\sigma] = \sigma_{0,2} - |\sigma_д| + \sigma_0,$$

где $\sigma_{0,2}$ — предел упругости материала детали;

$|\sigma_д|$ — действующее напряжение;

σ_0 — уровень остаточных напряжений после изготовления детали.

Эксплуатационный ресурс рассчитывают как

$$P_э = P_п/K_v,$$

где K_v — коэффициент рассогласования эксплуатационной и проектной скоростей, определяемый отношением $v_э/v_п$.

Тогда остаточный ресурс $P_о$ может быть определен как разность между $P_п$ и $P_э$.

В АООТ "ОКБ Сухого" проведен контроль четырех основных стоек шасси (рис. 6): 1 — стойка шасси без наработки; 2, 3, 4 — стойки с наработкой, оцениваемый числом применений N: 642; 1166 и 1175 соответственно. Используемый метод определения остаточных напряжений — метод вертикальной съемки рентгеновского максимума.

Стойки шасси изготовлены из стали 30ХГСН2А. Механические свойства данной стали в деформированном состоянии: $\sigma_в = 1620$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1375$ МПа. Для дальнейшего анализа принято допущение, что механические свойства литого материала в 1,5 раза ниже, чем у деформированного.

Для контроля выбрано шесть областей на поверхности каждой стойки в зонах термического влияния: область 1 соответствует литому состоянию материала, области 2—5 — деформированному. Вторая стойка шасси имеет трещину в области зоны термического влияния.

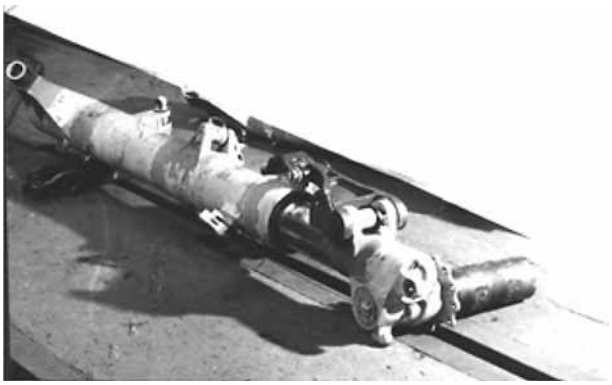


Рис. 6. Стойка шасси

В исследовании принято, что состояние стойки без наработки соответствует нулевому уровню изменения остаточных напряжений. В качестве показателя напряженного состояния поверхности других стоек для дальнейшего расчета остаточного ресурса принято максимальное среди шести зон приращение напряжений $\Delta\sigma_{max}$. Действующее расчетное напряжение равно 702 МПа, расчетная проектная скорость изменения остаточных напряжений составляет 1,12 МПа за одно применение.

В табл. 3 представлены результаты расчета остаточного ресурса для рассматриваемых стоек шасси.

В условиях ВНИИГАЗ провели контроль зон термического влияния двух фрагментов сварных соединений газопровода диаметром 1400 мм: с наработкой $\tau_2 = 17$ лет и без наработки (рис. 7).

Используемый метод — метод вертикальной съемки. Точки контроля — три области в зоне

3. Результаты расчета остаточного ресурса стоек шасси

Показатель диагностической модели	Номер стойки шасси		
	1	2	3
$\Delta\sigma_{max}$, МПа	0	290	360
$N_э$	0	642	1166
$v_э$, МПа/$N_э$	0	0,45	0,31
K_v	0	0,40	0,65
$P_э$, N	0	674	923
$P_о$, N	0	74	323
Ошибка расчета, %	—	+5	−20

Обозначение. $N_э$ — показатель, определяющий период фактической эксплуатации объекта.

4. Результаты расчета остаточного ресурса фрагментов сварных соединений трубопровода

Номер зоны	σ_{i1}, МПа	τ_1, год	σ_{i2}, МПа	τ_2, год	$v_э$, МПа/год	$[\Delta\sigma]$, МПа	$v_п$, МПа/год	K_v	$P_э$, год	$P_о$, год
1	28		288		15,3					
2	6	0	302	17	17,4 (max)	295	17,35	1,003	16,95	−0,05
3	210		283		4,3					

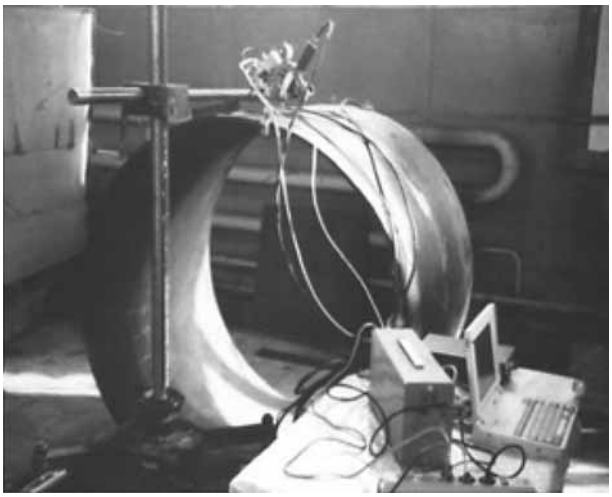


Рис. 7. Фрагмент сварного соединения газопровода в процессе контроля остаточных напряжений

термического влияния на разном расстоянии от продольного сварного шва. Полученные в зонах фрагментов остаточные напряжения приведены в табл. 4. Данные для расчета остаточного ресурса: $P_п$ = 17 лет; $\sigma_в \geqslant 540$ МПа; $\sigma_{0,2} \geqslant 390$ МПа [9]; $\sigma_д$ = 95 МПа.

Ошибка расчета остаточного ресурса составила 0,3 %.

Таким образом, по уровню остаточных напряжений, полученных при использовании портативного рентгеновского дифрактометра ДРП, можно эффективно проводить оценку технического состояния разных сварных соединений при изготовлении и ремонте, а также определять остаточный ресурс при их эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Григорьев С.Н.** Тенденции и проблемы модернизации машиностроительного производства на базе отечественного станкостроения // Вестник МГТУ "Станкин". 2010. № 3 (11). С. 7—13.

2. **Сосенушкин Е.Н.** Развитие систем пластического деформирования // Вестник МГТУ "Станкин". 2010. № 2. С. 12—20.

3. **Практическое** использование изменения механических характеристик конструкционных углеродистых сталей при холодной объемной штамповке / А.М. Дмитриев, Ф.В. Гречников, Н.В. Коробова, Н.С. Толмачев // Вестник МГТУ "Станкин". 2014. № 4 (31). С. 41—44.

4. **Разработка** инновационной технологии штамповки полой насосной штанги для нефтяных скважин / А.Э. Артес, Е.Н. Сосенушкин, А.М. Володин, В.В. Третьюхин // Вестник МГТУ "Станкин". 2011. № 2 (14). С. 18—21.

5. **Сосенушкин Е.Н., Белокопытов В.В.** Разработка ресурсосберегающей технологии производства фланцевых поковок на универсальном оборудовании // Вестник МГТУ "Станкин". 2010. № 3 (11). С. 35—41.

6. **Влияние** обработки давлением на микроструктуру и качество изделий из высокопрочного чугуна / Е.Н. Сосенушкин, А.С. Пономарев, А.Э. Артес, В.Н. Климов // Вестник МГТУ "Станкин". 2011. № 3 (15). С. 115—120.

7. **Ялышко Г.Ф.** Сварка трубопроводов высокого давления. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1993. 182 с.

8. **Sosenushkin E.N., Khromenkov A.V., Melnik Yu.A.** Mathematical model of adhesive wear of three-dimensional dies // Journal of Friction and Wear. 2014. Vol. 35. Iss. 6. P. 525—530.

9. **Котелкин А.В., Лютцау А.В., Звонков А.Д. и др.** Остаточные напряжения и портативные рентгеновские дифрактометры для их определения / Прогрессивные технологии ОМД: учеб.-метод. пособие. М.: ИРИАС, 2009. С. 423—435.

Александр Викторович Котелкин, канд. техн. наук, rant05@list.ru;
Александр Дмитриевич Звонков, канд. физ.-мат. наук;
Евгений Николаевич Сосенушкин, д-р техн. наук;
Дмитрий Борисович Матвеев, канд. техн. наук;
Илья Георгиевич Роберов, д-р техн. наук;
Александр Всеволодович Лютцау

УДК 621.762.01

Н.В. Коробова, А.М. Дмитриев, Н.С. Толмачев, А.Ю. Аксененко
(Московский государственный технологический университет "Станкин")

Исследование высокоплотных порошковых цилиндрических заготовок, сформованных на специализированных гидравлических прессах

Описаны высокоэффективные схемы формования порошковых заготовок, предусматривающие интенсивные сдвиги между частицами формуемого порошка. Для оценки качества формованных заготовок на этапе, предшествующем их спеканию, предложен метод испытания заготовок на срез в разработанном устройстве. На основе экспериментального исследования построена зависимость напряжения среза заготовки от схемы ее деформирования при формовании, а также состава порошковой шихты.

Ключевые слова: порошковые композиции на железной основе; формование холодное; оригинальные схемы; заготовки высокоплотные; оценка качества; испытание на срез в штампах; математическая модель напряжения среза.

The design of forming of the powder workpiece by highly effective scheme is described. It provides intense shifts between particles of the forming powder. To assess the quality of the formed blanks before their expensive sintering, the original method of the testing by the cutting of the pieces on simple device is designed. Based on the experimental study of the cutting stress of the workpiece at the stage of its forming, the influence of the scheme of deforming and of the composition of powder mixture, are described by the mathematical model.

Keywords: powder compositions based on iron; cold forming; original schemes; high-density parts; quality; hardness-test by cutting in dies; mathematical model of shear stress.

При производстве деталей из железных порошков применяют разные технологические процессы. Среди них формование на прессах из порошковой шихты заготовок простейшей формы, их спекание в защитной атмосфере и последующее деформирование в процессах холодной и горячей объемной штамповки, а также формование на прессах из порошковой шихты непосредственно порошковых деталей и их спекание в защитной атмосфере.

При использовании указанных технологических процессов возникает проблема недостаточно высокой плотности формованных заготовок простейшей формы (первый процесс) и формованных непосредственно порошковых деталей (второй процесс). Причины недостаточно высокой плотности, возможности их преодоления и способы оценки качества формуемых заготовок изложены ниже.

При пластической деформации компактных и пористых материалов одним из основных является сдвиговый механизм формоизменения [1—3]. При уплотнении пористых материалов этот механизм формоизменения играет особую роль, которая заключается в следующем.

При осевом уплотнении засыпанного порошка в закрытой матрице прикладываемая удельная сила (давление) составляет 600...800 МПа. Если удельная сила меньше 600 МПа или больше 800 МПа, то после уплотнения цельной заготовки порошковой детали не получается. При указанных давлениях уплотнения порошковая деталь после ее спекания имеет остаточную пористость 15...18 %. Из-за остаточной пористости детали не получают комплекс механических характеристик, включающий в себя высокие прочность и пластичность.

Причина разрушения порошковой заготовки при давлениях свыше 800 МПа показана на рис. 1. Образующиеся макропоры оказывают сопротивление уплотнению. Они, как все арочные конструкции, очень устойчивы к действию сжи-

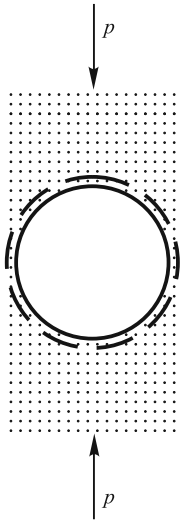


Рис. 1. Образование микротрещин в порошковой заготовке вокруг сферической поры

мающих напряжений *p*. Раньше, чем эти поры закроются, под действием *p* на поверхности пор зарождаются трещины, и заготовка разрушается.

При остаточной пористости 15...18 % легирующие порошковую шихту добавки практически не оказывают влияния на качество детали. Эффект легирования начинает проявляться при пористости <10 %.

Для получения высокоплотных заготовок или деталей формованием из порошковой шихты необходимо осуществлять формование в условиях, при которых в заготовке происходят интенсивные сдвиги между частицами (рис. 2). Если кроме сжимающего давления *p* приложить сдвигающее напряжение τ, пора легко закроется, и трещины по ее границам зарождаться не будут.

Таким образом можно формовать высокоплотные детали из засыпаемой в матрицу порошковой шихты, минуя формование и спекание промежуточной заготовки простейшей формы, например, цилиндрической. Из такой заготовки, если она будет существенно легирована, изготовить деталь холодным выдавливанием не удастся из-за разрушения инструмента. Поскольку уплотнение шихты осуществляют до спекания заготовки, легирование шихты практически не приводит к повышению силы, требуемой для придания заготовке необходимой формы. Метод дает возможность повышения легирования порошковых сталей, изготовления деталей из любых композиций, при этом удельная сила на формующем инструменте не превышает 1000 МПа.

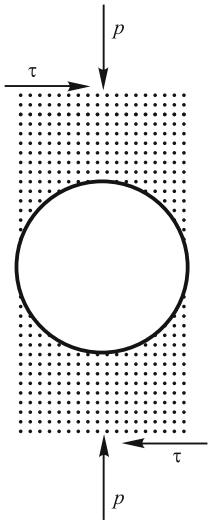


Рис. 2. Закрытие показанной сферой поры при приложении к заготовке сдвигающих напряжений τ

В настоящее время обработка давлением сближается с материаловедением. Специалисты по обработке давлением решают проблемы изменения механических характеристик материалов, которые не могли решить ранее с помощью традиционных приемов материаловедения. В порошковой металлургии наименее разработанной является операция формования деталей из металлического порошка.

Формование высокоплотных деталей со сдвигом частиц целесообразно осуществлять на специализированных прессах для выдавливания. В частности, на прессе марки РПГ-37, изготовленном ОАО "Тяжпрессмаш" (г. Рязань). Пресс РПГ-37 имеет номинальную силу 6,3 МН. Схема этого пресса опубликована в ряде изданий, например в [1].

По такому же принципу, но с еще большим сокращением металлоемкости сконструирован другой пресс (рис. 3).

В нижней поперечине рассматриваемого пресса расположен корпус главного и вспомогательного гидроцилиндров. Главный цилиндр содержит шток и поршень, с закрепленным на нем нижним пуансоном. Вспомогательный гидроцилиндр содержит шток и гильзу, соединенную с матрицей, причем шток вспомогательного гидроцилиндра выполнен за одно целое со штоком главного гидроцилиндра, а гильза вспомогательного гидроцилиндра установлена в полости главного гидроцилиндра.

Схема разработанного авторами статьи специализированного гидропресса, созданного ОАО "СП Донпрессмаш" (г. Азов), представлена на рис. 4 [1]. Номинальная сила пресса 4 МН.

В верхней поперечине *1* закреплен корпус *4* гидроцилиндра *5* с поршнем *6*, который соединен с траверсой *7*. Направление траверсы *7* по колоннам *3* происходит по направляющим втулкам *8*. В траверсе жестко закреплен верхний пуансон *9*. В зоне нижней поперечины *2* расположены главный гидроцилиндр *10* с поршнем *11* и штоком *12* и соосно расположенный с ним вспомогательный гидроцилиндр *13*, содержащий шток *12* и гильзу *14*, поршень *11* главного гидроцилиндра *10* соединен с нижним пуансоном *15*, гильза *14* вспомогательного гидроцилиндра *13* соединена с матрицей *16*, при этом шток *12* вспомогательного гидроцилиндра *13* выполнен за одно целое со штоком *12* главного гидроцилиндра *10*, а гильза *14* вспомогательного

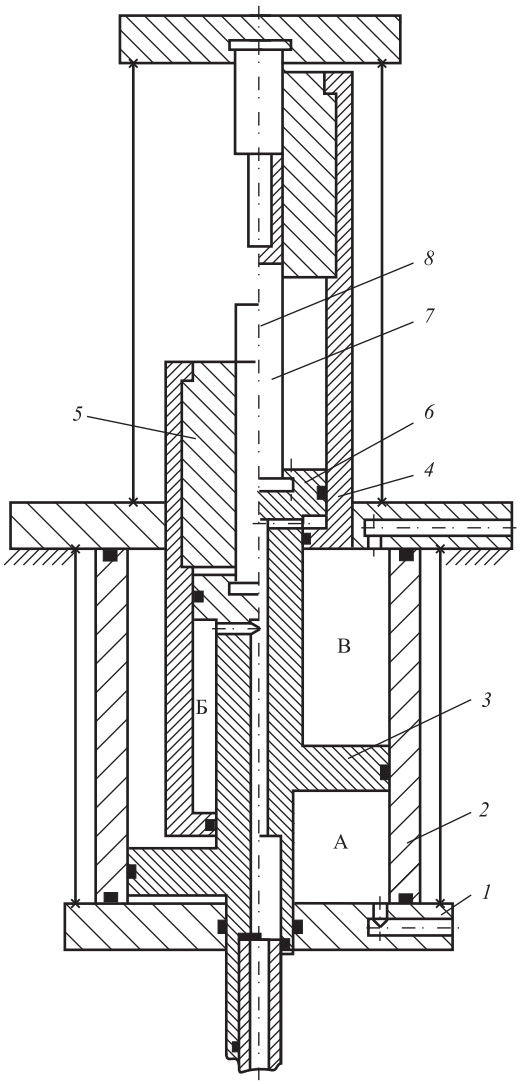


Рис. 3. Малогабаритный специализированный гидропресс

гидроцилиндра *13* установлена в полости главного гидроцилиндра *10*.

В прессе реализованы независимые перемещения трех инструментов за счет движения верхней траверсы и сложной конструкции нижнего гидравлического цилиндра, позволяющего одновременно и независимо перемещать два инструмента.

Формование осевым сжатием с одновременным созданием в заготовке сдвигов слоев материала осуществляется на этих прессах по схеме, приведенной на рис. 5.

Первая схема деформирования включает в себя формование заготовки осевым сжатием с одновременным ее радиальным выдавливанием в полость, открывающуюся при перемещении из верхней цилиндрической полости матрицы диаметром 32 мм в нижнюю цилиндрическую полость диаметром 36 мм (см. рис. 5, *а*). Вторая схема деформирования включала в себя те же операции, что и первая, а затем прямое выдавливание с диаметра 36 до 32 мм (см. рис. 5, *б*).

В последние годы у специалистов по обработке давлением при изучении пластических свойств материалов широкое распространение получили схемы сложного деформирования образцов [3]. Образцы подвергаются одновременному воздействию комбинаций нагрузок: растягивающей (сжимающей) силы и крутящего момента; внутреннего (внешнего) давления и либо крутящего момента, либо растягивающей (сжимающей) силы. Эти эксперименты позволяют определять накопленные заготовкой деформации, в том числе предельные.

При повышении плотности формованных из порошков на железной основе заготовок появилась возможность проводить их механические испытания в неспеченном состоянии.

В достаточно полной мере оценку качества порошковых заготовок позволяют получить испытания материала на сдвиговую прочность

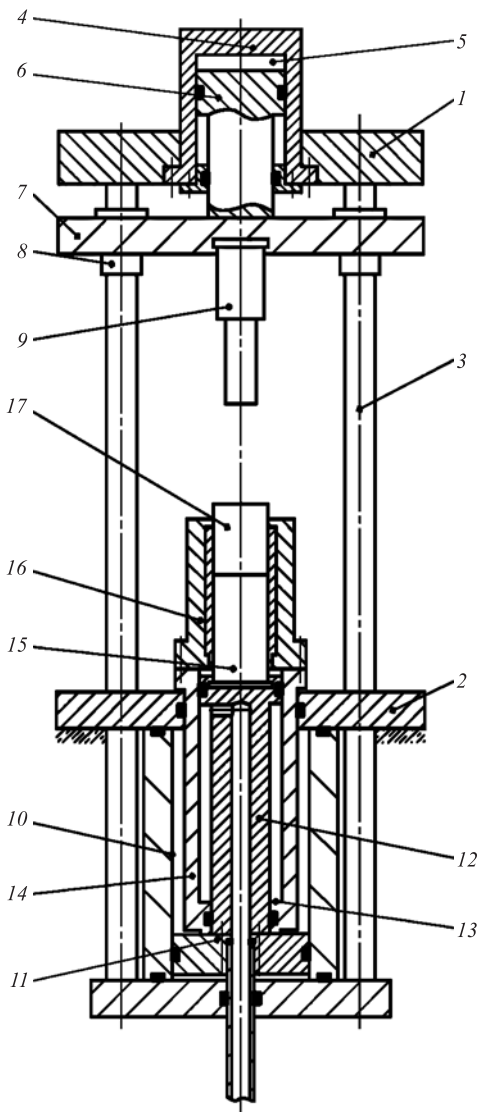


Рис. 4. Схема гидропресса силой 4 МН, созданного совместно с ОАО "СП Донпрессмаш"

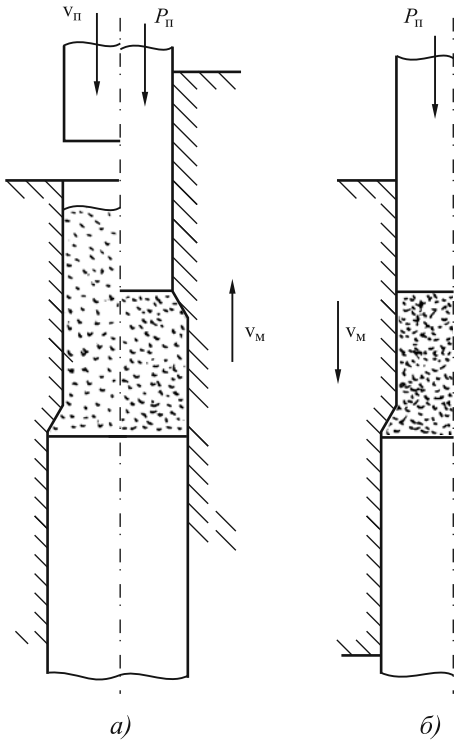


Рис. 5. Схема формования порошковой заготовки осевым сжатием с созданием сдвигов слоев материала:

$p_п$ — давление на торец заготовки, создаваемое пуансоном, перемещаемым со скоростью $v_п$ при одновременном перемещении матрицы со скоростью $v_м$

комбинированной нагрузкой, описанные в работе В.Е. Перельмана (Формование порошковых материалов. М.: Металлургия, 1979. 232 с.)

Деформацию пористого тела осуществляют в установках трехосного нагружения при варьировании сочетания осевых и боковых нагрузок, приложенных к цилиндрическим образцам (рис. 6 и 7).

При реализации приведенных на рис. 6 и 7 схем испытаний существует много сложностей, что требует проведения работ в специализированных исследовательских лабораториях. В то же

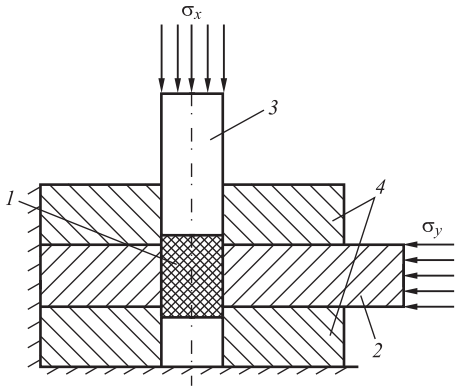


Рис. 6. Схема установки для испытания порошковых заготовок разрушением:

1 — образец; *2* — нож; *3* — пуансон; *4* — плиты

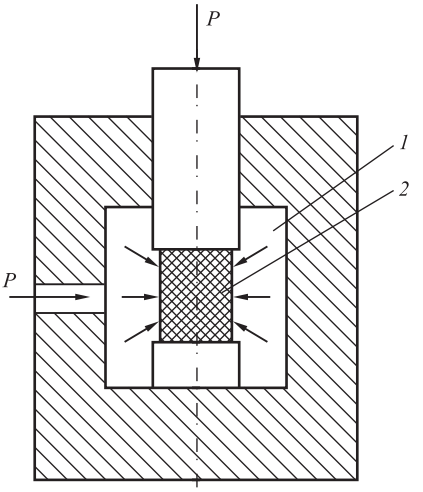


Рис. 7. Схема установки для испытания порошковой заготовки:

1 — камера под давлением; *2* — заготовка

время разработка этих схем специалистами в области порошковой металлургии свидетельствует о необходимости дальнейшей работы в этом направлении.

В данном случае высокая плотность образцов до их спекания позволила применить для испытания на сдвиговую прочность штамп, в котором не создают дополнительного осевого напряжения (рис. 8).

Изготовлены два комплекта ножей штампа для определения сдвиговой прочности $\tau_{ср}$, отличающихся друг от друга только диаметрами ножей. Их применяют для разрезки цилиндрических заготовок с диаметром 36 и 32 мм, получаемых при реализации первой и второй схемы деформирования соответственно.

Фотографии ножей штампа приведены на рис. 9.

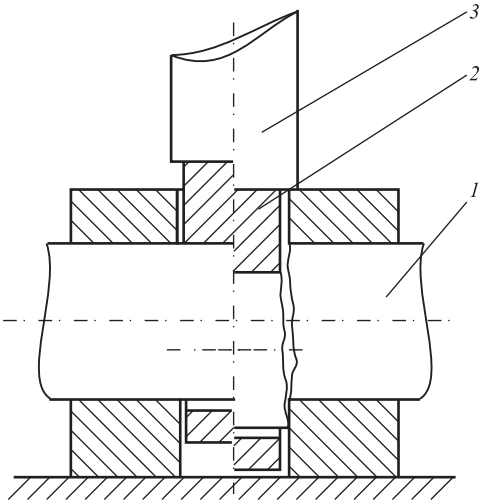


Рис. 8. Схема штампа для испытания образцов на сдвиговую прочность $\tau_{ср}$:

1 — образец; *2* — нож; *3* — пуансон

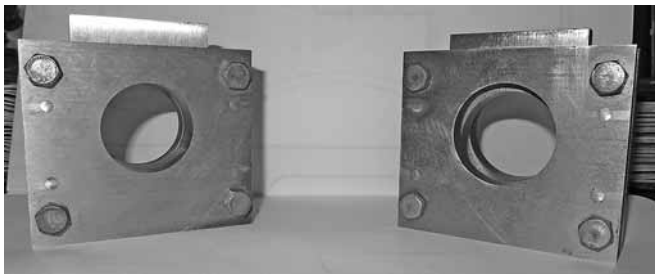


Рис. 9. Общий вид ножей штампа для испытания заготовок на сдвиговую прочность

Сдвиговую прочность определяли по формуле

$$\tau_{ср} = \frac{F}{2S}, \qquad (1)$$

где F — максимальная сила, при которой происходит срез, Н;

$2S$ — суммарная площадь среза образца по двум поверхностям, м^2.

В эксперименте использовали порошковую шихту на основе железного порошка марки ПЖРВ3.200.28 (ГОСТ 9849—86). Определяли влияние на величину $\tau_{ср}$ схемы деформирования, количества стеарата цинка, играющего роль смазки, количества углерода в порошковой шихте. Углерод вводили в порошковую шихту для повышения прочности заготовки после ее спекания и, соответственно, прочности изготовленной из этой заготовки детали.

Факторам были присвоены следующие обозначения: схема деформирования — X_1; содержание стеарата цинка, % — X_2; содержание углерода, % — X_3.

После проведения и обработки результатов опытов получено уравнение регрессии, которое имеет вид:

$$\tau_{ср} = 14{,}38 + 12{,}78X_1 + 2{,}84X_2 - 4{,}7X_3. \qquad (2)$$

Анализ полученной модели позволил сделать следующее заключение.

Установлено сильное влияние на прочность заготовки схемы деформирования заготовки (X_1). Так, при среднем значении $\tau_{ср}$ = 22,36 МПа схема деформирования изменяет это напряжение на 12,78 МПа: от 15,25 до 28,03 МПа. Величина $\tau_{ср}$ увеличивается при второй схеме деформирования в 1,84 раза по сравнению с первой схемой. Таким образом, более интенсивное действие сдвигов в материале формуемой заготовки оказывает наиболее значительное влияние на сопротивление заготовки срезу до ее спекания.

При первой и второй схемах деформирования $\tau_{ср}$ выше при большем содержании пластификатора (стеарата цинка), так как смазка способствует снижению трения между частицами и позволяет достичь при формовании большей плотности заготовки.

Повышение количества углерода в шихте оказало противоположное действие по сравнению с увеличением количества пластификатора. Это можно объяснить тем, что имеющий пластинчатую структуру порошок углерода, распределенный между зернами железного порошка, способствует при испытаниях заготовки на срез скольжению зерен порошка друг относительно друга под действием сдвигающих напряжений.

Рассмотренные влияния содержания в шихте стеарата цинка и углерода характерны только при испытаниях заготовок, не подвергнутых спеканию. В процессе спекания стеарат цинка выгорает, а углерод взаимодействует с частицами железного порошка, осуществляя его легирование.

Практическая значимость предлагаемого сравнительно несложного метода испытания качества сформованных порошковых заготовок заключается в том, что качество оценивается на ранней стадии технологического процесса, т.е. до спекания деталей.

Спекание порошковых деталей проводят в специальных печах с восстановительной или защитной атмосферами. В этих печах осуществляется ступенчатый нагрев заготовок с выдержками для выгорания пластификатора и для остужения спеченных деталей в защитной атмосфере до температур ниже тех, при которых происходит интенсивное окисление материала. Учитывая, что операция спекания является одной из самых дорогостоящих в процессах порошковой металлургии, возможность контролировать качество заготовок до спекания позволяет получить существенную экономию материальных ресурсов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Ковка** и штамповка: справочник. В 4 т. Т. 3. Холодная объемная штамповка. Штамповка металлических порошков / под ред. А.М. Дмитриева. 2-е изд., перераб. и доп. / под общ. ред. Е.И. Семенова. М.: Машиностроение, 2010. 352 с.

2. **Коробова Н.В., Дмитриев А.М.** Производство машиностроительных деталей из порошковых материалов с одновременным измельчением порошка до наноструктурного состояния // Технология легких сплавов. 2009. № 1. С. 47—52.

3. **Дмитриев А.М., Крук А.Т., Хван А.Д.** Улучшение эксплуатационных и технологических свойств элементов конструкций пластическим деформированием. Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2011. 216 с.

Наталья Васильевна Коробова, д-р техн. наук,
mt-6@yandex.ru;
Александр Михайлович Дмитриев, чл.-кор. РАН,
д-р техн. наук;
Никита Сергеевич Толмачев;
Анатолий Юрьевич Аксененко

УДК 621.7.043

М.А. Прусаков *(Московский государственный технологический университет "Станкин", ФГУП "НПО "Техномаш", г. Москва)*

Глубокая вытяжка тонкостенной полусферы пуансонами с различным профилем*

Представлены результаты испытания образцов на растяжение из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т с использованием оптической системы измерения полей деформации. Изложен метод расчета профиля пуансона переменной кривизны. Приведена конструкция штамповой оснастки. Представлены результаты эксперимента по глубокой вытяжке тонкостенной полусферы пуансонами с различным профилем.

Ключевые слова: глубокая вытяжка; тонкостенная полусфера; профиль пуансона; переменная кривизна; штамповая оснастка; распределение толщины; сила вытяжки.

The results of tensile tests of samples stainless steel 321 AISI using the optical measurement system of deformation fields are presented. Calculation method of curved profile for punch is described. Construction of die tooling is shown. Results of the experiment deep drawing of thin-walled hemisphere using punches with different profiles are presented.

Keywords: deep drawing; thin-walled hemisphere; punch profile; variable curvature; die tooling; thickness distribution; drawing force.

Введение. В современном машиностроении актуальными являются проблемы разработки энергосберегающих технологий на основе развития цифровых методов проектирования технологий и производств листовой штамповки [1—5]. Одновременно становятся все более жесткими и требования к конструкциям техники. Для авиационно-космической промышленности такими требованиями являются: минимальная масса, максимальная жесткость и прочность узлов, максимальный ресурс работы конструкций в условиях эксплуатации, высокая надежность.

Одними из важных узлов конструкций и наиболее соответствующих перечисленным выше требованиям являются оболочки сферообразной формы. В основном их изготовляют из коррозионно-стойких сталей 12Х18Н10Т, 08Х18Н12Б, титановых сплавов ВТ5, ОТ4, а также высокопрочных алюминиевых сплавов, сплавов на основе молибдена и вольфрама методами горячей и холодной листовой штамповки.

При глубокой вытяжке полусферы происходит быстрое уменьшение толщины в полюсе сферы. На практике для получения полусферы применяют сложный многопереходный процесс вытяжки осесимметричного ступенчатого полуфабриката с плоским торцом и радиусом закругления. После проводят обтяжку жестким инструментом и калибровкой.

При наличии трения по поверхности пуансона участки заготовки, контактирующие с рабочим торцом пуансона, испытывают действия сил трения, затрудняющих перемещение заготовки относительно пуансона и уменьшающих утонение, что приводит к смещению опасного сечения от полюса сферы.

Сечение с минимальной толщиной, по которому может произойти разрушение при вытяжке сферических деталей, расположено примерно на радиусе закругления около плоского торца. Радиус закругления пуансона оказывает существенное влияние на утонение стенок материала у дна изделия при операциях вытяжки.

При малом значении радиуса снижается эффективная прочность в опасном сечении изделия. Это происходит из-за превышения меридионального напряжения относительно напряжения текучести, так как пластическая деформация и упрочнение материала малы вследствие отсутствия деформации на плоском торце.

Исследования процессов глубокой вытяжки криволинейным профилем пуансона, предотвращающим локальный разрыв металла, приведены в работе [6].

В данной работе представлены результаты испытаний на растяжение листового образца из стали 12Х18Н10Т и эксперимента по глубокой вытяжке тонкостенной полусферы пуансонами с различным профилем.

Построение кривой упрочнения. Два образца были вырезаны из листа коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т толщиной 1 мм на лазерном станке. Заусенцы и град, образовавшиеся после резки, были удалены механически с помощью напильника. Размеры образцов выбраны согласно ГОСТ 11701—84 для типа I.

Испытания на растяжение образцов были выполнены в лаборатории исследования свойств материалов МГТУ "Станкин" на универсальной

* Данная работа финансировалась Министерством образования и науки РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности ФГБОУ ВПО МГТУ "Станкин" (№ 9.2445.2014/К от 11.07.2014 г.).

электромеханической испытательной машине Instron 5989 силой 600 кН с применением оптической системы измерения полей деформаций Correlated Solution VIC 3D. Система позволяет выполнять анализ полей деформаций в трехмерном пространстве на поверхности образца, а также анализ перемещений и скоростей посредством методики численной корреляции цифровых изображений.

В ходе проведения эксперимента по растяжению фиксировались значения относительных перемещений точек базовой длины l, силы F и перемещения траверсы испытательной машины S.

Для построения кривой упрочнения вычисляли логарифмическую деформацию:

$$e = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right). \quad (1)$$

Истинное напряжение:

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (2)$$

где F — текущее значение силы;

$S = bh$ — площадь с текущей шириной b и толщиной h.

Из условия пластической несжимаемости объем сохраняется, следовательно:

$$l_0 b_0 h_0 = lbh,$$

где l_0, b_0, h_0, l, b, h — начальные и текущие значения длины, ширины и толщины образца соответственно.

Отсюда:

$$bh = b_0 h_0 \exp(-e), \quad (3)$$

где $\exp(-e) = \frac{l_0}{l}$.

Подставляя (3) в (2), получаем

$$\sigma = \frac{F}{b_0 h_0}\exp(e). \quad (4)$$

Кривая упрочнения стали 12Х18Н10Т приведена на рис. 1.

Эксперимент по вытяжке. Предложено вести глубокую вытяжку тонкостенной полусферы радиусом $R_{сф}$ = 50 мм жестким пуансоном с прижимом фланца заготовки за один переход. Исследовано влияние формы пуансонов на график технологической силы и распределение толщины стенки по образующей детали.

Для проведения эксперимента по глубокой вытяжке тонкостенных полусфер была спроектирована и изготовлена штамповая оснастка (рис. 2), состоящая из кольца опорного *1*, матрицы *2*, кольца прижимного *3*, втулки направляющей *4*, пуансона *5* и толкателя *6*. Прижим заготовки осуществляется за счет силы затяжки шести болтов *7*.

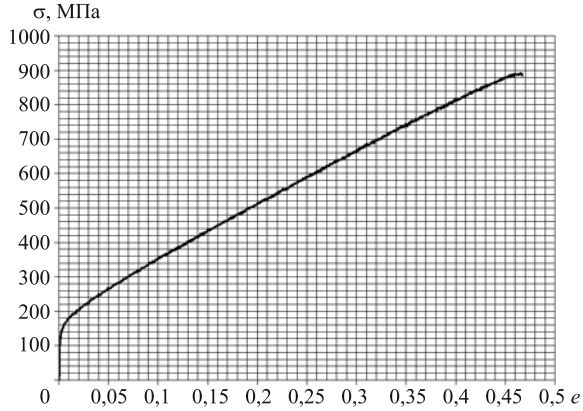
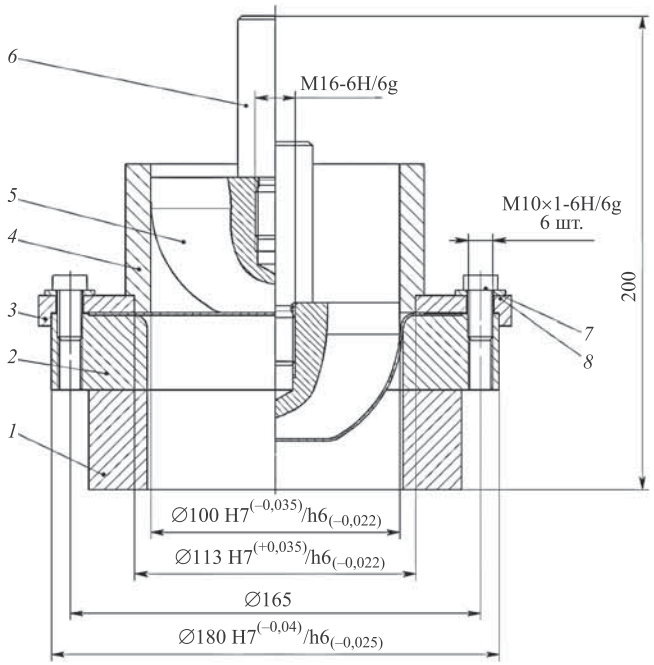


Рис. 1. Кривая упрочнения коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т

В комплект оснастки входит четыре типа пуансонов, представленных в таблице.



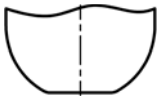
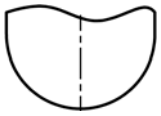
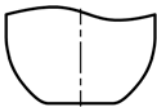
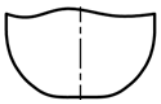
а)

б)

Рис. 2. Штамповая оснастка:

а — чертеж штампа; *б* — изготовленная оснастка

Типы пуансонов

Номер формы пуансона	Схема	Форма пуансона
1		Сфера радиусом $R_{сф}$ = 50 мм
2		Сфера радиусом $R_{сф}$ = 50 мм, плоским дном r_0 = 20 мм и радиусом скругления $R_{скр}$ = 10 мм
3		Сфера радиусом $R_{сф}$ = 50 мм, кривая сопряжения плоского дна r_0 = 18 мм и сферической части и угол сопряжения со сферой α = 0,635
4		Сфера радиусом $R_{сф}$ = 50 мм, кривая сопряжения плоского дна r_0 = 11 мм и сферической части и угол сопряжения со сферой α = 1,25

Профиль пуансонов № 3 и № 4 представлен на рис. 3. Точки O_1, A профиля, сопрягающего плоское дно и сферическую часть непрерывно изменяющейся кривизной, заданы радиусом r_0 на плоском торце и углом α на сфере соответственно. Кривизна задана в виде квадратичной функции от безразмерной координаты $\tilde{x}$:

$$\chi = a_1\tilde{x} + a_2\tilde{x}^2; \quad \tilde{x} = \frac{x}{R}. \qquad (5)$$

Параметры a_1, a_2 выбирают исходя из выполнения граничных условий $\chi = \frac{1}{R}$, $\varphi = \alpha$ в т. A. Решение данной задачи описано в работе [7].

Результатом моделирования является таблица значений точек кривой сопряжения, которые заносятся в систему ЧПУ станка для обработки сложного профиля пуансона [7].

Оснастка изготовлена в лабораторном комплексе "Полигон — опытное производство" ГИЦ МГТУ "Станкин". Заготовки в виде дисков диаметром 150 мм были вырезаны на лазерном станке из того же листа, что и образцы для испытаний на растяжение. Для центрирования заготовок в матрице предусмотрена проточка диаметром 150 мм и глубиной 0,5 мм.

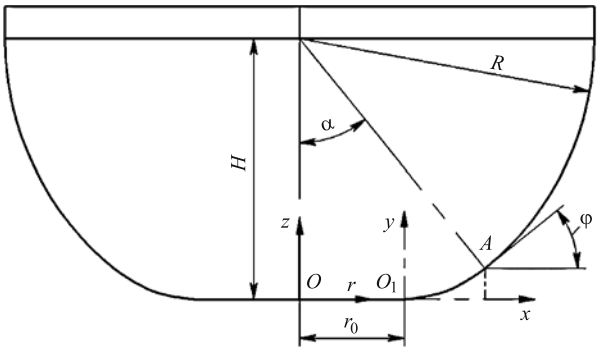


Рис. 3. Профиль пуансона

Силу прижима при вытяжке вычисляли по формуле

$$P_{пр} = q_{пр}F = 29 \text{ кН}, \qquad (6)$$

где $q_{пр}$ = 3,75 Н/мм^2 — удельная сила, выбрана в соответствии с [6]; F — площадь под прижимом.

Расчет требуемого крутящего момента затяжки болта выполнен согласно [6]:

$$M_{кр} = P_б\left(0,5d_2\tan(\beta+\rho) + f_т R_{тр}\right) = 12,4 \text{ Н}\cdot\text{м}, \qquad (7)$$

где $P_б$ = 4,8 кН — требуемая сила прижима для одного болта;

d_2 = 8,35 мм — средний диаметр резьбы;

β = 0,038 — угол подъема винтовой линии;

ρ = 0,1 — угол трения резьбовой пары;

$f_т$ = 0,2 — коэффициент трения по торцу;

$R_{тр}$ = 5,84 мм — приведенный радиус трения.

Затяжку болтов выполняли динамометрическим ключом.

Смазку наносили на внутреннюю поверхность втулки, проточку матрицы для заготовок и внутреннюю поверхность прижима. В качестве смазки использовали индустриальное масло (ГОСТ 20799—88). Рабочие поверхности пуансона и заготовки не смазывали.

Вытяжку проводили на универсальной электромеханической испытательной машине Instron 5989 силой 600 кН. В процессе вытяжки фиксировалось значение силы от перемещения траверсы машины. Для четырех типов пуансонов было проведено по три эксперимента вытяжки.

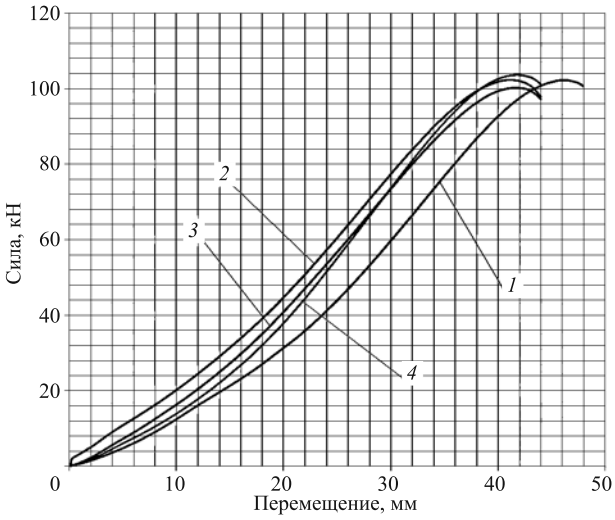


Рис. 4. График силы при перемещении пуансонов:

1 — форма № 1; *2* — форма № 2; *3* — форма № 3; *4* — форма № 4

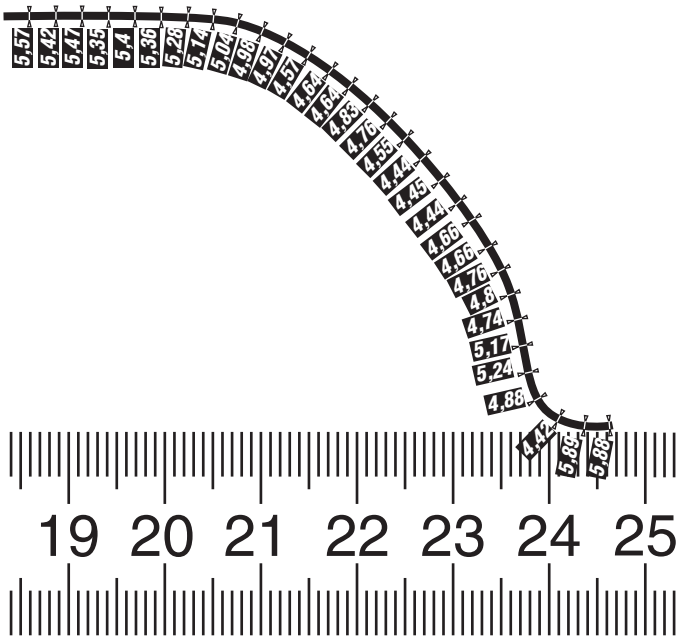


Рис. 5. Измерение толщины вдоль образующей детали

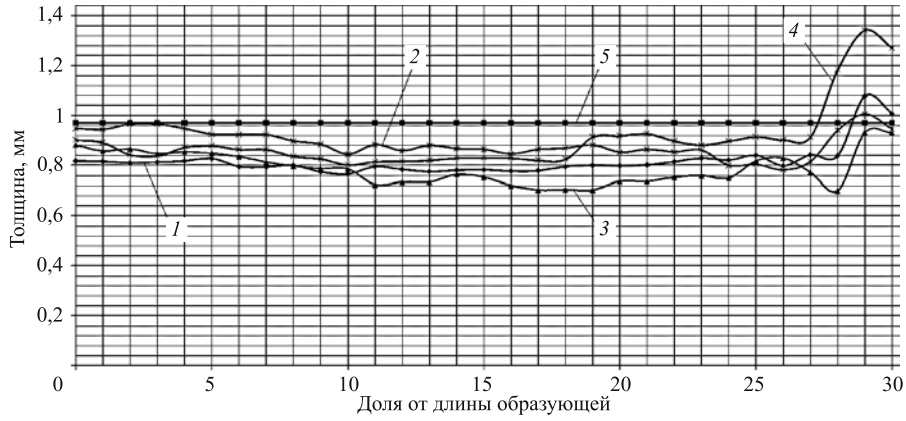


Рис. 6. Распределение толщины стенки при вытяжке пуансонами:

1 — форма № 1; *2* — форма № 2; *3* — форма № 3; *4* — форма № 4; *5* — толщина исходной заготовки

На рис. 4 приведены графики изменения силы вытяжки F в зависимости от перемещения пуансона S для указанных в таблице форм пуансонов.

Для измерения толщины стенки вдоль образующей полученные детали разрезали по диаметральной плоскости на станке гидроабразивной резки. Разрезанные образцы сканировали и измеряли значения толщины в 30 точках от полюса к фланцу с помощью чертежной программы и масштаба, определяемого по линейке.

На рис. 5 представлен пример измерений толщин вдоль образующей для образца, полученного пуансоном с формой № 3. Образующая включает в себя плоский участок, кривую сопряжения, сферическую часть, конический участок, полученный из-за наличия зазора между матрицей и пуансоном и выбранного в соответствие с [6], радиусную часть при контакте с матрицей и зону фланца. Конический участок определяли по проведенной касательной к радиусной и сферической частям.

На рис. 6 показаны результаты измерения толщины стенки вдоль образующей детали для исследуемых форм пуансонов.

Заключение. Исследования показали незначительное влияние формы пуансона на максимальную силу вытяжки. При вытяжке сферическим пуансоном производная сила вытяжки по перемещению снижается.

При вытяжке пуансоном различной формы получены детали заданной глубины без дефектов разрушения.

Результаты измерения толщины стенки вдоль образующей детали при вытяжке пуансонами различной формы показали наименьшее утонение в полюсе детали, наибольшее утонение в средней части образующей и увеличение толщины на участке перехода к фланцу. Утонение зависит от формы пуансона и изменяется в полюсе от 2,4 до 15,7 %, в средней части от 11 до 22,4 %, в конической части от 7,6 до 22,7 %. На фланцевой части толщина увеличивается до 27,6 %.

Смазка фланцевой части заготовки и прижима и контроль среднего давления прижима при отсутствии смазки на рабочей поверхности пуансона при проведении экспериментов благоприятно влияют на процесс вытяжки без разрушения детали.

Полученные результаты показали возможность глубокой вытяжки тонкостенной полусферы за один технологический переход. При этом изменение толщины стенки вдоль образующей детали зависит от формы пуансона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Григорьев С.Н.** Тенденции и проблемы модернизации машиностроительного производства на базе отечественного станкостроения // Вестник МГТУ "Станкин". 2010. № 3 (11). С. 7—13.

2. **Артес А.Э.** Развитие кузнечно-прессового производства в отечественном машиностроении // Вестник МГТУ "Станкин". 2010. № 2. С. 2—12.

3. **Сосенушкин Е.Н.** Развитие систем пластического деформирования // Вестник МГТУ "Станкин". 2010. № 1. С. 30—38.

4. **Григорьев С.Н., Кутин А.А., Долгов В.А.** Принципы построения цифровых производств в машиностроении // Вестник МГТУ "Станкин". 2014. № 4 (31). С. 10—15.

5. **Мальцева О.С.** Моделирование организационно-технологических структур цехов и участков листовой штамповки // Вестник МГТУ "Станкин". 2013. № 2 (25). С. 96—98.

6. **Непершин Р.И.** Проектирование технологических процессов в машиностроении: учеб. пособие. М., 2011.

7. **Прусаков М.А.** Профиль пуансона для глубокой вытяжки тонкостенной полусферы // Труды XV науч. конф. "Математическое моделирование и информатика"/ под ред. Д.Ю. Рязанова. М.: ИЦ ФГБОУ ВПО МГТУ "Станкин", 2013. 281 с.

Максим Анатольевич Прусаков,
_max_p_@mail.ru

УДК 621.777.24

А.М. Дмитриев, Н.В. Коробова, Н.С. Толмачев
(Московский государственный технологический университет "Станкин")

Производство корпусных деталей выдавливанием, совмещенным с раздачей стенки, на специализированных гидравлических прессах

Изложен обзор работ по объяснению эффекта снижения силы при штамповке корпусных деталей машиностроения выдавливанием из сплошных цилиндрических заготовок, совмещенным с раздачей их стенки, а также отрицательного опыта промышленной реализации этой комбинированной технологической операции на универсальных штамповочных прессах. Предложено решение указанной проблемы путем создания специализированного технологического оборудования.

Ключевые слова: корпусные детали машиностроения; выдавливание из цилиндрических заготовок; снижение деформирующей силы; рациональное сочетание формоизменяющих операций; специализированные прессы.

Information about the previous papers connected extruding of the body parts of the mechanical engineering is provided. Explanation by different scientists to the reduction of the effect of force during extrusion with the scheme of M. Kunogi is given. Negative result of industrial implementation of this technological operation on the universal stamping presses is described. Given the results of the study considered technological operation by the authors of this article and new explanation of the reduced force is justified. The solution of the problem is given by the creation of specialized pressing equipment.

Keywords: body parts of mechanical engineering; extrusion from cylindrical work pieces; reduction of force; rational combination of stamping operations; specialized press.

В промышленности применяют детали в виде стаканов с конической, расширяющейся придонной частью (рис. 1).

Приведенные на рис. 1 заготовки в зависимости от типа изготовляемых изделий могут служить непосредственно корпусами изделий или играть роль полуфабриката, подвергаемого последующей вытяжке с утонением стенки.

В патенте [1] рассмотрена схема выдавливания стаканов приведенного типа, которая является аналогом схемы (рис. 2), известной ранее [2].

В [2] эта схема приведена со ссылкой на М. Куноги, который опубликовал ее в 1966 г. при описании своих исследований по холодному выдавливанию стаканов из стали. При этом в работах [1, 2] отмечено, что необходимая деформирующая заготовку сила при таком выдавливании значительно уменьшается.

Поскольку деформируемый металл (см. рис. 2) течет в направлении перемещения ползуна пресса, отечественные исследователи назвали ее прямым выдавливанием. Именно в направлении течения деформируемого материала они искали причину снижения деформирующей заготовку силы, необходимой для требуемого ее формоизменения. Это нашло отражение в публикациях в журналах "Известия вузов. Машиностроение" (1982, 1985 и 1986 гг.), "Кузнечно-штамповочное производство" (1984 и 1985 гг.), книге У. Джонсон, П. Меллор. "Теория пластичности для инженеров" (пер. с англ. А.Г. Овчинникова. М.: Машиностроение, 1979. 267 с. (задача 47)) и др.

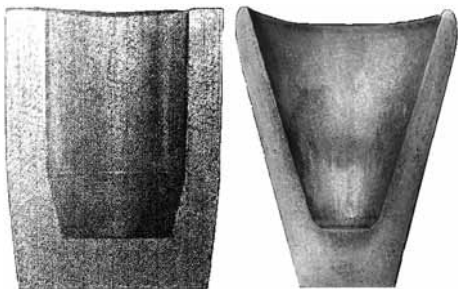


Рис. 1. Стаканы с конической придонной частью

Однако в этот период также были отечественные работы, посвященные операции штамповки поковок типа стаканов, где сопоставлены их прямое выдавливание и обратное выдавливание, в которых высказывалось противоположное мнение.

Например, в статье Д.П. Кузнецова с соавторами (О холодном выдавливании полых цилиндрических изделий из малоуглеродистой стали // Кузнечно-штамповочное производство. 1972) сделан вывод "...все данные исследования и внедрения в производство процесса обратного выдавливания полых цилиндрических изделий из сплошных заготовок в равной степени распространяются на процесс прямого выдавливания этих же изделий из сплошных заготовок".

Однако приведенный выше вывод является спорным, поскольку при обратном выдавливании в неподвижной матрице (в отличие от схемы на рис. 2) имеет место другая площадь поверхности трения на контакте заготовки с матрицей по сравнению с прямым выдавливанием.

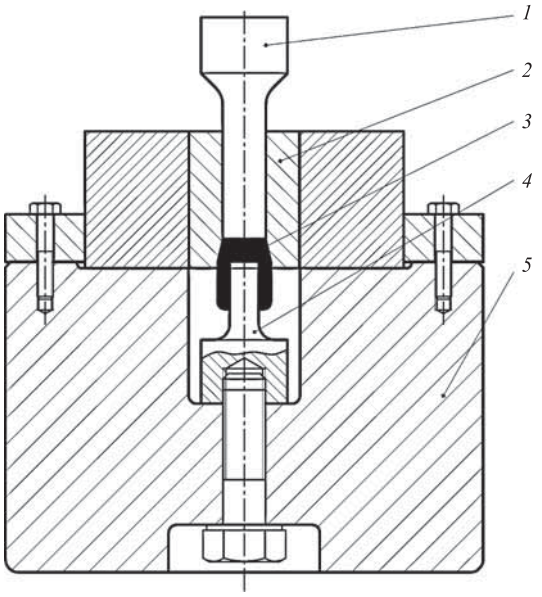


Рис. 2. Вариант инструмента для прямого выдавливания:
1 — верхний пуансон; *2* — матрица; *3* — изделие; *4* — нижний пуансон; *5* — опорная плита

При обратном выдавливании по отношению к неподвижной матрице смещается только часть металла заготовки в очаге пластической деформации под торцом пуансона, имеющем относительно небольшую высоту, а также в выдавленной стенке стакана. Придонная часть заготовки остается неподвижной по отношению к матрице.

При прямом выдавливании эта придонная часть заготовки так же, как и другие ее части, проталкивается по поверхности матрицы, поэтому при прямом выдавливании сила контактного трения и общая деформирующая заготовку сила больше, чем при обратном.

Исходя из указанного различия в площадях контактного трения по поверхности матрицы, термины "прямое выдавливание" и "обратное выдавливание" теряют свой смысл при выдавливании с активно направленными силами контактного трения (рис. 3). Если скорость перемещения матрицы $v_м$ больше скорости истечения металла $v_{ист}$, то направление сил трения на контакте с матрицей способствует течению металла. Это позволяет снизить необходимую для выдавливания удельную силу на пуансоне на 10...15 %, что увеличивает в 1,5 раза и более стойкость выдавливающих пуансонов.

Схема на рис. 3 целесообразна для выдавливания деталей, имеющих одинаковый диаметр по всей их высоте, и не подходит для выдавливания деталей, показанных на рис. 1. Однако в данном случае речь идет о влиянии направления выдавливания: прямое или обратное на деформирующую заготовку силу. Приведенные выше рассуждения подтвердили точку зрения, что снижение деформирующей силы при выдавливании по схеме, показанной на рис. 1, не связано с направлением течения выдавливаемого при деформировании заготовки металла.

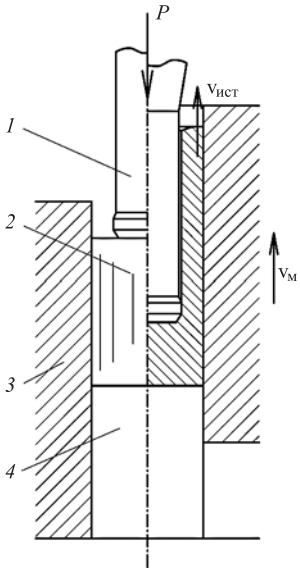


Рис. 3. Схема выдавливания с активно направленными силами трения:
1 — пуансон; *2* — заготовка; *3* — матрица; *4* — выталкиватель

В учебнике М.В. Сторожева, Е.А. Попова "Теория обработки металлов давлением" выдавливанием названа операция, при которой "происходит истечение металла, заключенного в замкнутую полость, через отверстие в ней, форма которого определяет поперечное сечение выдавленного участка деформированной заготовки". Штамповка выдавливанием принципиально не отличается от процессов прессования, которые широко распространены для производства прутков, профилей и труб из различных материалов.

В то же время деформирование заготовки, направленное на производство поковок типа стаканов, М.В. Сторожев и Е.А. Попов отделяют от процессов выдавливания и называют закрытой прошивкой.

При промышленном применении отечественными технологами схемы М. Куноги необходимость осуществления именно прямого выдавливания привела к созданию конструкции промышленного штампа, схематично показанной на рис. 4.

В этом штампе заготовка устанавливается на съемник *2*. При ходе ползуна пресса вниз матрица *4*, установленная на верхней плите *6*, опускается по направляющей *8* до упора в нижнюю часть штампа, при этом образуется постоянный зазор между коническими поверхностями пуансона *1* и матрицы *4*. Одновременно с этим заготовка пуансоном *1* проталкивается в участок полости матрицы меньшего диаметра. При дальнейшем ходе вниз ползуна пресса пуансон *5*, совершая движение в полости верхней плиты штампа *6*, выдавливает заготовку в зазор между пуансоном *1* и матрицей *4*. Матрица *4* при этом поджимается к нижней части штампа силами трения между деформируемой заготовкой и участком полости матрицы меньшего диаметра, а на заключительной стадии выдавливания — пружинами *7*. При возвратном ходе ползуна пресса штампованная поковка *3* снимается с пуансона *1* съемником *2*.

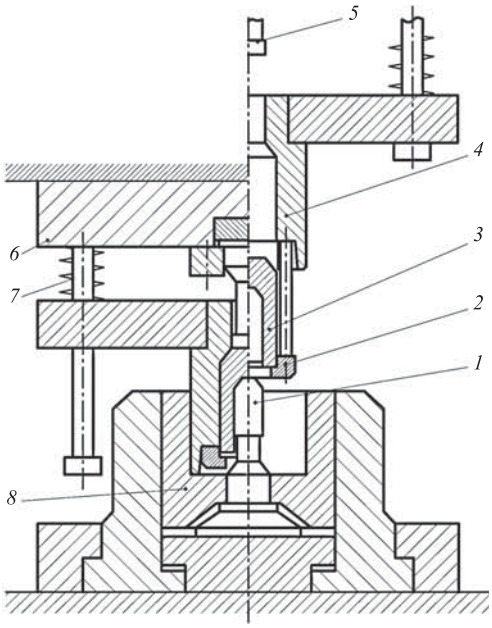


Рис. 4. Промышленный штамп для прямого выдавливания рассматриваемых деталей

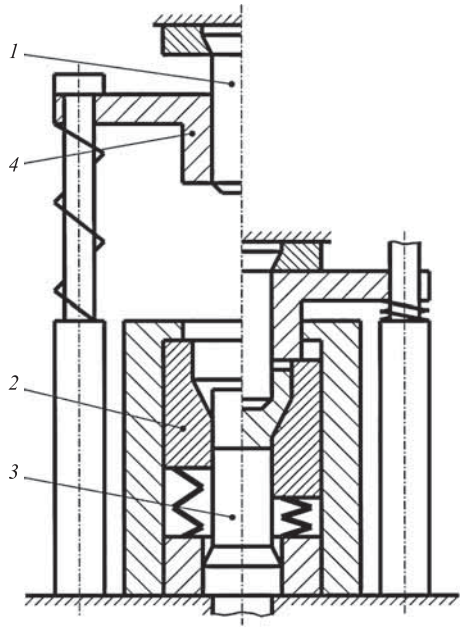


Рис. 5. Штамп для закрытой прошивки, совмещенной с раздачей заготовки в движущейся матрице

Штампы, созданные по схеме, приведенной на рис. 4, были изготовлены и прошли апробацию на нескольких машиностроительных заводах. При этом возникли следующие проблемы.

Штампы устанавливали на универсальные прессы, не имевшие выталкивателей из ползунов. Поэтому было невозможно вытолкнуть штампованную поковку *3*, застрявшую в матрице *4*. Обязательным условием серийного производства являлось нахождение поковки *3* на пуансоне *1* при открытии штампа. Этому было уделено большое внимание технологов. Тем не менее, поковка оставалась на пуансоне не всегда. Это приводило к остановке производства, необходимости демонтажа матрицы для извлечения из нее застрявшей поковки.

Авторы работ [2, 3] и инженер Н.Е. Попов обосновали это снижение рациональным сочетанием операций закрытой прошивки заготовки (по терминологии М.В. Сторожева и Е.А. Попова) и последующей раздачи формирующейся стенки стакана.

При таком подходе штамповка может быть осуществлена в штампе, конструкция которого приведена на рис. 5.

Штамп работает следующим образом. При опускании верхней плиты с пуансоном *1* приводится в движение съемник *4*, который в момент касания пуансоном заготовки начинает синхронно перемещать вниз матрицу *2*. По окончании выдавливания выталкиватель *3* удаляет штампованную поковку из матрицы. Если произойдет застревание поковки на пуансоне, она снимается при возвратном ходе пресса съемником *4*.

В работах [2, 3] показано, что снижение силы выдавливания при использовании схемы М. Куноги является результатом рационального сочетания операций закрытой прошивки заготовки и раздачи на пуансоне стенок формирующегося при прошивке стакана.

Выдавливание деталей, показанных на рис. 1, целесообразно осуществлять на созданном авторами статьи специализированном прессе для выдавливания РПГ-37, изготовленном в ОАО "Тяжпрессмаш" (г. Рязань). Пресс РПГ-37 имеет номинальную силу 6,3 МН.

Авторы статьи в течение ряда лет работают над созданием специализированных прессов для выдавливания осесимметричных деталей, используемых в крупносерийном и массовом производствах изделий. Однако такие прессы были созданы несколько позже того времени, когда описанную в статье проблему технологи пытались решить с применением универсального прессового оборудования и штампов к нему, имевших конструкции, показанные на рис. 4 и 5.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Пат. 2446909 РФ, МПК B21K21/04, B21D51/54.** Способ изготовления гильз патронов стрелкового оружия / Ю.И. Гуменюк, Н.В. Спасенко, В.А. Яшкин и др. Опубл. 10.04.2012, Бюл. № 10.

2. **Воронцов А.Л.** Технологические задачи теории пластичности. Т. 2. М.: Машиностроение-1, 2006. 397 с.

3. **Дмитриев А.М., Воронцов А.Л.** Технология ковки и объемной штамповки. Ч. 1. Объемная штамповка выдавливанием: учебник для вузов по специальности "Машины и технология обработки металлов давлением". М.: Высшая школа, 2002. 400 с.

Александр Михайлович Дмитриев, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, countess.olga@gmail.com;
Наталья Васильевна Коробова, д-р техн. наук;
Никита Сергеевич Толмачев

УДК 621.974.063

Ю.В. Колотов, А.Г. Кобелев, Д.С. Чашкин
(Московский государственный технологический университет "Станкин")

Усовершенствование конструкции ударной массы штамповочного молота

Предложены конструкции ударных масс, которые могут быть использованы в шаботных и бесшаботных, скоростных и высокоскоростных молотах. Приведены схема распространения ударных волн в конструкции ударной массы и расчет напряжений, возникающих в элементах составной ударной массы при ударе по жесткой преграде.

Ключевые слова: молот; масса; удар; энергия; волна; штамповка.

The constructions of the shock masses that can be used in anvil and no anvil, speed and high-speed hammers are offered. Chart over of distribution of shock waves in the construction of shock mass and the calculation of tensions arising up in the elements of component shock mass at blow to the hard barrier are presented.

Keywords: hammer; mass; blow; energy; wave; stamping.

В конструкцию ударной массы (падающих частей молота) входят: баба, шток, поршень, часть штампа и клин. По конструктивной форме бабы штамповочного и ковочного молотов представляют собой прямоугольную поковку с отверстиями в центре для крепления штока [1]. Их изготовляют ковкой из высококачественной стали. Наиболее распространенным креплением штампов к бабе на штамповочных молотах является крепление с помощью ласточкина хвоста, шпонки и клина. Его выполняют как в бабе, так и в подушке или штамподержателе, которые крепят к шаботу также посредством ласточкина хвоста. Способы крепления штампов на кузнечно-штамповочном оборудовании приведены в работах [3—8].

В современном машиностроении широкое распространение в отраслях оборонной промышленности получили высокопрочные, труднодеформируемые материалы. Для увеличения пластичности штампуемого материала рекомендуют повышать скорость удара на штамповочных молотах до 8 м/с. Возникающий при скоростном ударе тепловой эффект снижает сопротивление материала деформированию. В то же время, высокие скорости удара увеличивают напряжения в материале бабы и шабота, особенно в конструкции крепления штампа с помощью ласточкина хвоста. Причиной этого является наличие концентраторов напряжений в конструкции паза.

На высокоскоростных молотах, на которых скорость удара достигает 20 м/с, взамен клинового соединения применяют крепление штампа к ударной массе посредством коротких шпилек. Их резьбовые соединения часто ослабевают и требуют постоянного контроля затяжки гаек в процессе эксплуатации машины [1].

На вертикальных бесшаботных молотах мод. МШ, разработанных в Конструкторско-технологическом филиале института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения РАН (г. Новосибирск), применены сборные по конструкции ударные массы, в которых подштамповая плита и баба соединены между собой длинными шпильками. Принцип их действия основан на встречном движении двух ударных масс. В настоящее время в опытно-промышленной эксплуатации молоты мод. МШ с номинальной эффективной энергией 4; 6,3; 100; 250 кДж. Скорость удара достигает на некоторых моделях 15 м/с. Ударная масса, примененная в их конструкциях, представлена на рис. 1, *а*.

На горизонтальных бесшаботных молотах мод. ГШМ, разработанных авторами статьи по заказу ОАО "Донпрессмаш" (г. Азов, Ростовская обл.), предусмотрена установка ударных масс, конструкция которых выполнена по схемам, как на рис. 1, *а*, так и на рис. 1, *б*. В ударной массе, представленной на рис 1, *а*, установлено устройство типа "байонет", предназначенное для крепления штампов для осесимметричных круглых в плане поковок [5]. В конструкции ударной массы, показанной на рис. 1, *б*, применено устройство типа "ласточкин хвост" для любого типа штампов.

ОАО "Донпрессмаш" изготовлены молоты мод. ГШМ с энергиями удара 4; 100 и 250 кДж. Молот мод. ГШМ-4 установлен в лаборатории кафедры "Системы пластического деформирования" в МГТУ "Станкин", принимавшем участие в разработке систем управления молотами мод. ГШМ. В настоящее время проводятся пуско-наладочные работы молота.

При выборе конструкции ударной массы на молотах мод. МШ и ГШМ авторы стремились выполнить ее из деталей простой формы, с минимальным числом концентраторов напряжений. Ударная масса (УМ) сделана сборной, со-

стоящей из подштамповой плиты и бабы (самой массивной части УМ), соединенных между собой длинными шпильками. В подштамповой плите предусмотрено крепление штампа. Вследствие высоких динамических нагрузок и контактных давлений в материале плиты ее можно изготовить из высокопрочного материала с термообработкой, сменной под любое крепление штампа.

Объем материала и напряжения в шпильках, соединяющих между собой подштамповую плиту и бабу, назначали из условия гашения ими энергии отражения частей ударной массы друг от друга в процессе удара. Сквозные отверстия в УМ под шпильки выполняли в направлении удара, благодаря чему, вследствие неизменяющейся площади поперечного сечения плиты и бабы, они не являются концентраторами напряжений от ударных волн при ударе. Гайки на концах шпилек *4* затягивали с расчетной силой и контрили.

Байонетное крепление штампа *1* (см. рис. 1, *а*), выполненное в подштамповой плите *2*, имеет кольцевой паз *8* с вырезами под выступы *6*, сделанные на цилиндрической обойме штампа *1*. Оно позволяет осуществить быструю смену штампа. Выступы *6* по ширине *d* меньше ширины *A* прорези кольцевого паза. Штамп *1* устанавливают на подштамповую плиту *2* так, чтобы выступы *6* на обойме штампа *1* вошли в прорези пазов в плите *2*.

Затем штамп *1* поворачивают специальным ключом в кольцевом пазу подштамповой плиты на такой угол, при котором выступы *6* на обойме полностью войдут в кольцевой паз *8* плиты *2*. При этом верхние поверхности паза будут препятствовать вертикальному перемещению обоймы. Паз и выступы выполняют по винтовой линии, благодаря чему при повороте штампа происходит затяжка соединения, в котором подштамповая плита *2* является гайкой, а роль болта играет штамп *1*.

При сборке штампа в байонете плита *2* и баба *3* должны иметь плотный контакт по всей поверхности их касания. Расчетную силу затяжки шпилек *4* обеспечивают динамометрическим ключом. При ударе сила деформирования прижимает штамп *1* к подштамповой плите *2*, препятствуя тем самым ее перемещению при ударе по инерции.

Для снятия штампа *1* с молота поворачивают его на угол, при котором выступы *6* попадут в вырезы в подштамповой плите *2*. Далее штамп *1* поднимают вверх и выносят из штампового пространства. На место прежнего штампа *1* ставят другой штамп и также поворотом обоймы закрепляют его в подштамповой плите *2*.

На рис. 1, *б* показано крепление штампа *1* к подштамповой плите *2* с помощью хвостовика *5*. Подштамповая плита *1* крепится к бабе *3* также длинными шпильками *4*, пропущенными сквозь УМ, при этом длина шпилек больше

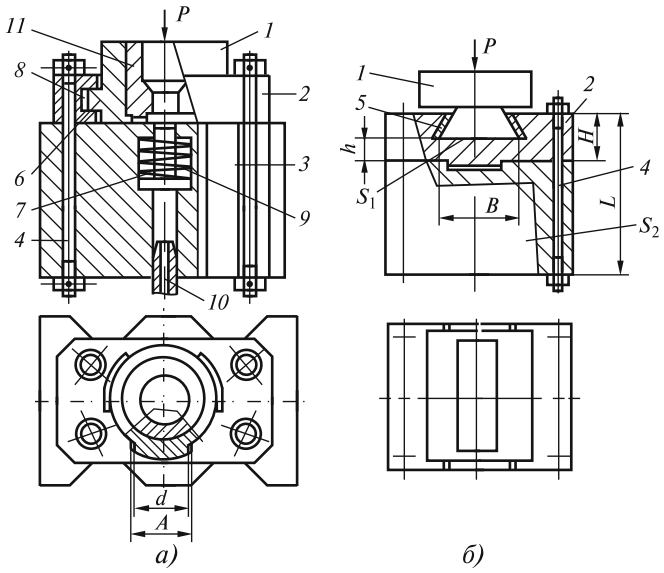


Рис. 1. Конструкция ударной массы штамповочного молота:

а, *б* — крепление штампа байонетом и клином соответственно; *1* — штамп; *2* — подштамповая плита; *3* — баба; *4* — шпилька; *5* — хвостовик; *6* — выступ байонета; *7* — пружина; *8* — паз; *9* — выталкиватель; *10* — трубопровод для подачи жидкости под давлением в выталкиватель; *11* — матрица; *H* — толщина подштамповой плиты; *h* — толщина плиты под пазом; *L* — высота ударной массы; *B* — ширина паза; *P* — сила деформирования; S_1, S_2 — площади основания хвостовика штампа (бойка) и поперечного сечения бабы

суммарной высоты *L*. Плита *2* имеет толщину *h* под штампом *1*, обеспечивающим жесткость при ударе. Штамп *1* крепится к плите *2* клиньями. При разрушении узла крепления штампа замене подлежит только подштамповая плита *2*, что существенно снижает затраты на изготовление ударной массы. Возможна замена подштамповой плиты *2* в зависимости от способа крепления штампа *1*.

На основании модернизации УМ бесшаботного молота можно осуществить модернизацию конструкции УМ и шабота шаботного молота (рис. 2).

Модернизация рабочих частей шаботного молота позволяет вернуть в рабочее состояние УМ и шабот с разрушенными пазами под хвостовик путем установки на них подштамповой плиты с новым узлом крепления штампа и присоединенной к массиву (бабе) длинными шпильками.

Максимальные силы, которые действуют на крепление подштамповой плиты *2* к бабе, могут возникать в следующие моменты работы молота:

1) при отскоке, когда пуансон и матрица *11* (см. рис. 1) соединяются друг с другом через облой в распор. Возникает сила, которая препятствует извлечению пуансона из матрицы *11*. Обычно перемещение пуансона из матрицы осуществляют за счет энергии отскока УМ при соударении частей штампа, поэтому штамповку осуществляют с избыточной для удара энергией;

2) наиболее неблагоприятным является удар штампа о штамп с номинальной энергией. Такой удар возможен при эксплуатации молота и его должен выдержать материал деталей ударной массы. Он аналогичен по характеру удару массы по жесткой преграде. Схема прохождения ударных волн в элементах ударной массы представлена на рис. 3.

В результате жесткого удара бойка *1* в его материале распространяется прямая волна со скоростью v_1. На границе штамп—подштамповая плита она делится на обратную (отраженную) волну, перемещающуюся в материале штампа со скоростью v_{01}, и проходящую волну, распространяющуюся в материале массы *3* со скоростью v_2. Проходящая волна становится в бабе прямой волной. На границе баба—воздух прямая волна, двигающаяся ранее со скоростью v_2, отразится от свободного торца бабы *3*, граничащего с воздухом, с той же скоростью $v_{02} = v_2$.

Скорости прямых и отраженных волн определяли по закону равенства сил и импульсов при ударе:

$$S_0(\sigma_1 + \sigma_{01}) = S_2\sigma_2; \quad (1)$$

$$\rho_1\vartheta_1 c_1 - \rho_{01}\vartheta_{01}c_{01} = \rho_2\vartheta_2 c_2, \quad (2)$$

где σ_1, σ_2 — напряжения, вызываемые падающей (прямой) волной; σ_{01}, σ_{02} — напряжения, вызываемые отраженной волной; $\sigma_{02} = \sigma_2$.

Так как все элементы ударной массы изготовлены из стальных сплавов, имеющих одинаковую плотность ρ_i и скорость распространения ударной волны c_i, то уравнение (2) можно привести к виду:

$$v_i + v_{0i} = v_{(i+1)}.$$

Совместным решением уравнений (1)—(3) определены напряжения, возникающие в элементах конструкции ударной массы:

в штампе:

$$\sigma_1 = \rho v_1 c; \quad (4)$$

в подштамповой плите:

$$\sigma_{01} = \sigma_1 \frac{S_0 - S_2}{S_0 + S_2}; \quad (5)$$

в бабе:

$$\sigma_2 = \frac{S_0^2}{S_2(S_0 + S_2)}\sigma_1. \quad (6)$$

Элементы ударной массы выполнены из стали: плотность $\rho = 7{,}8\cdot10^3$ кг/м^3; v_1 — скорость ударной массы при разгоне; c — скорость распространения упругой волны в материале (сталь), $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$. При принятых значениях модуля упругости $E = 2\cdot10^5$ МПа и ρ скорость $c \approx 5200$ м/с.

Из уравнений (4)—(6) следует, что напряжения в штампе пропорциональны скорости разгона ударной массы. На молотах мод. ГШМ $v_1 = 4$ м/с. Отношение $\frac{S_2}{S_0} = 5{,}4$, тогда напряжение σ_1 ~162 МПа.

Из анализа диаграммы, представленной на рис. 3, следует, что боек *1* отражается от подштамповой плиты *2* со скоростью υ_{01}, развивая кинетическую энергию T:

$$T = \frac{m_б\vartheta_{01}^2}{2}, \quad (7)$$

где $m_б$ — масса бойка.

Энергия отражения T поглощается упругой энергией растяжения шпилек $T_у$:

$$T = T_у \quad \text{или} \quad T = \frac{m_б\vartheta_{01}^2}{2} = \frac{\sigma_д^2}{2E} n V_ш, \quad (8)$$

где $\sigma_д$ — допускаемые напряжения в шпильках; $V_ш$ — объем материала шпилек, подвергнутых упругой деформации; n — число шпилек, $n = 6$.

Ударная масса молота мод. ГШМ-4 имеет следующие параметры: $S_0 = 0{,}0154$ м^2; $S_2 = 0{,}0841$ м^2; $m_б = 13{,}2$ кг; $V_ш = 126\cdot10^{-3}$ м^3. Шпилька изготовлена из стали 45 с термообработкой 36...38 HRC. Модуль упругости $E \approx 2{,}1\cdot10^5$ МПа; номинальная скорость удара — 8 м/с. Скорость одной ударной массы $v_1 = 4$ м/с. Согласно уравнениям (4)—(6) при принятых значениях: $\sigma_{01} = -0{,}69\sigma_1$, а $v_{01} = -2{,}76$ м/с; $\sigma_2 = 0{,}028\sigma_1$ или $v_2 = v_{02} = 0{,}112$ м/с. Таким образом, баба может быть выполнена из конструкционной стали без термообработки, а подштамповая плита — из легированной стали с термообработкой.

Подставляя известные величины в (8), определяем $\sigma_д \approx 170$ МПа. Предел выносливости термообработанной стали 45 $\sigma_{-1} = 540$ МПа, тогда коэффициент запаса $\approx 3{,}2$, что отвечает требованиям прочности к материалам для тяжелонагруженных элементов конструкции.

Для подтверждения величины сил, действующих между подштамповой плитой и бабой при ударе о жесткую преграду, были проведены экспериментальные исследования на модели ударной массы. В разработке конструкции модели, представленной на рис. 4, и проведении экспериментов принимал участие аспирант МГТУ "Станкин" И.В. Илькин.

При сборке модели ударной массы создавали плотность контакта между подштамповой пли-

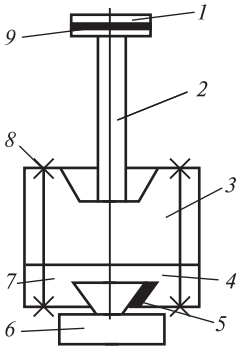


Рис. 2. Ударная масса шаботного молота:

1 — поршень; *2* — шток; *3* — баба; *4* — подштамповая плита; *5* — клин; *6* — штамп; *7* — шпилька; *8* — гайка; *9* — уплотнение

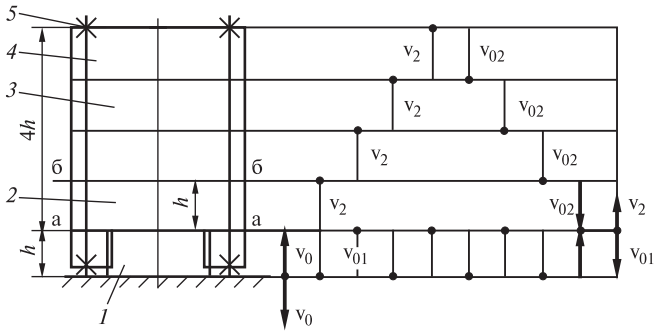


Рис. 3. Прохождение ударных волн через ударную массу при ударе по жесткой преграде:

1 — боек; *2* — подштамповая плита; *3* — баба; *4* — шпилька; *5* — гайка; v_0, v_{01}, v_2, v_{02} — скорости удара и ударных волн в материале соударяющихся тел; аа, бб — плоскости разделения элементов ударной массы; *h* — высота бойка и подштамповой плиты

той *5* и бабой *4* натяжением проволоки *3*, путем ввертывания винтов *1* в диск *2*. Штамп *6* вставляли в паз, ширина которого равна его диаметру и крепили к бабе *4* винтом (на рис. 4 он не показан), ввернутым в нее по центру штампа. Модель ударной массы испытывали на стенде, представленном на рис. 5.

С помощью троса *2* поднимали ударную массу *3* на высоту H = 1; 2 или 3 м. Высоту подъема определяли визуально по нижнему торцу ударной массы. Он должен совпадать с нижней линией окна, вырезанного в трубе на заданной высоте. На рис. 5 высота подъема ударной массы составляет 3 м.

В исходном для удара положении трос *2* освобождают от силы натяжения и исследуемое тело, под действием силы тяжести падает вниз. Скорость его удара v_0 о преграду определяли расчетом по формуле $v_0 = \sqrt{1,8gH}$, где g — ускорение

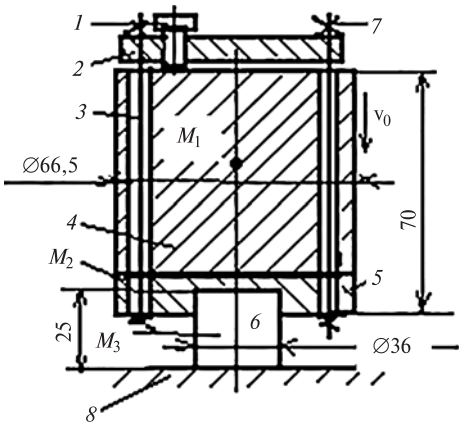


Рис. 4. Экспериментальная модель и расчетная схема удара ударной массы о жесткую преграду:

1 — винт; *2* — диск; *3* — проволока; *4* — баба; *5* — подштамповая жесткая преграда; плита; *6* — штамп; *7* — крепления проволоки; *8* — жесткая преграда; M_1, M_2, M_3 — массы бабы, плиты и штампа соответственно

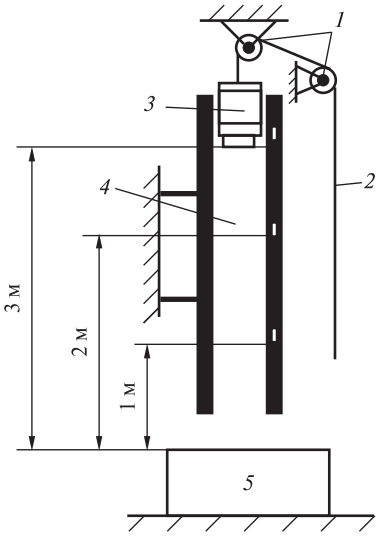


Рис. 5. Эскиз стенда для испытаний модели ударной массы на удар:

1 — блоки; *2* — трос; *3* — ударная масса (испытываемый образец); *4* — труба с мерными окнами; *5* — жесткая преграда (шабот)

свободного падения тела. В расчетах принят коэффициент 1,8, вместо 2, благодаря чему учитывали снижение скорости падения ударной массы силами трения ее о стенки трубы *4*.

Стенд для испытания на удар ударной массы представлен на рис. 6.

Он состоит из металлической трубы, закрепленной вертикально и жестко, в данном случае к станине пресса. В стенке трубы сделаны пазы — окна для фиксации исходной высоты падения исследуемого тела. Внизу под трубой установлена массивная поковка, играющая роль шабота или жесткой преграды.

В соответствии с волновой теорией удара при ударе происходит первоначально отскок бабы от штампа и подштамповой плиты при ударе по жесткой преграде. В результате падения модели ударной массы *3* с высоты 2 м с расчетной скоростью ~6 м/с между бабой *4* и подштамповой плитой *5* (см. рис. 4) образуется зазор 0,2 мм. При этом вследствие энергии отражения бабы происходит удлинение проволоки за пределом упругости, в пластической зоне.

При экспериментах применена проволока из коррозионно-стойкой стали диаметром 1 мм. Для определения механических свойств материала проволоки провели ее испытание на разрыв. Проволока разрушилась под действием силы P = 921 Н. При этом видимого сужения сечения проволоки не обнаружено. Площадь поперечного сечения проволоки $S = 7,85 \cdot 10^{-7}$ м^2. Предел прочности материала проволоки $\sigma_в$ = 1172,7 МПа, а напряжение текучести $\sigma_т$ = 938 МПа.

По данным Ю.А. Бочарова, А.А. Хорычева (О диапазоне скоростей рабочих частей кузнечно-штамповочных машин // Труды МВТУ.

Рис. 6. Общий вид устройства для испытания изделий на удар

1973. Вып. 10. 127 с.), скорость распространения ударной волны в коррозионно-стойкой стали c = 5700 м/с, тогда модуль упругости материала проволоки составляет $E = c^2\rho$. Если принять $\rho = 7{,}8\cdot10^3$ кг/м^3, то $E = 2{,}53\cdot10^5$ МПа.

Полагали, что при растяжении на 0,2 мм не происходит упрочнения проволоки и напряжение в ней постоянно и равно $\sigma_т$. Зная площадь поперечного сечения проволоки, определили силу P, с которой плита отражает от себя бабу, P = 1473 Н. Модель ударной массы имеет массу 0,4 кг, тогда ее ускорение при отскоке a = 3556 м/с^2. На пути S = 0,2 мм баба развивает согласно формуле $\vartheta^2 = 2aS$ при отражении от подштамповой плиты скорость v = 1,2 м/с.

Для надежной работы ударной массы необходимо, чтобы стык между ее элементами не раскрывался при ударе. При этом стяжные шпильки должны работать в упругой зоне, а напряжения, возникающие в них, не должны превышать $\sigma_т$. Если принять допускаемые напряжения в шпильках, которые стягивают между собой плиту и бабу [σ] = 200 МПа, то из формулы (8) определим T и объем шпилек V = 2,9 см^3. При длине шпилек 7 см и их числе n = 4 площадь поперечного сечения модели $S_0 \approx 7\cdot10^{-6}$ м^2, а диаметр шпильки $d \approx 3$ мм.

Перенесем результаты экспериментальных исследований на натуру, например на молот мод. МШ-4. Его эффективная энергия $T_{эф}$ = 4 кДж. Ударная масса $M_1 \approx 164$ кг движется на нем перед ударом со скоростью 4 м/с, что соответствует высоте падения $H \approx 1{,}5$ м. Расчетная скорость отскока бабы от плиты при скорости падения 4 м/с составляет, как на натуре, так и модели v = 0,96 м/с.

Определяли физический масштаб моделирования $K_ф$, равный отношению эффективных энергий натуры и модели: $K_ф = \dfrac{T_н}{T_м}$. При одинаковых скоростях отражения бабы на модели и натуре он равен отношению масс: $K_ф = \dfrac{m_н}{m_м}$. В данном случае $K_ф$ = 410. Тогда геометрический масштаб моделирования $K_г = \sqrt[3]{K_ф}$ или $K_г$ = 7,4. Находим диаметр одной шпильки крепления подштамповой плиты к бабе на натуре: $d_ш \approx 22$ мм, а ее площадь поперечного сечения $S_ш$ = 3,9 см^2.

Заключение. Разработана конструкция ударной массы шаботного молота, состоящая из простых по форме и сменных деталей, соединенных между собой упругими длинными шпильками, поглощающими энергию отражения их друг от друга в процессе удара.

В предлагаемой конструкции ударной массы можно изготовлять ее элементы из различных по прочности материалов и осуществлять замену тяжелонагруженных при ударе подштамповой плиты и штампа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Ковка и штамповка:** справочник. В 4-х. т. Т. 2. Горячая объемная штамповка. 2-е изд., перераб. и доп. / под общ. ред. Е.И. Семенова. М.: Машиностроение, 2010. 720 с.
2. **Кирдеев Ю.П., Корнилова А.В.** Экспериментальное определение напряжений в деталях машин: методическое пос. к выполнению лабораторных работ. М.: Издательский центр МГТУ "СТАНКИН", 2002. 40 с.
3. **Колотов Ю.В.** Новая конструктивная схема гидравлического молота // Вестник МГТУ "Станкин". 2010. № 3 (11). С. 80—81.
4. **Дмитриев А.М., Коробова Н.В., Петров М.Д.** Разработка технологии производства корпуса гидроцилиндра из железного порошка // Вестник МГТУ "Станкин". 2014. № 1 (28). С. 31—35.
5. **Колотов Ю.В.** О динамике бесшаботного молота с гидравлическим механизмом связи // Вестник МГТУ "Станкин". 2010. № 2 (10). С. 31—39.
6. **Сосенушкин Е.Н., Овечкин Л.М.** Совершенствование процессов интенсивной пластической деформации // Вестник МГТУ "Станкин". 2012. № 1 (19). С. 22—25.
7. **Колотов Ю.В.** О гидромеханической формовке и устройствах ее реализации // Системы пластического деформирования материалов: сб. науч. тр. / под ред. д-ра техн. наук, проф. Е.Н. Сосенушкина, канд. техн. наук, доц. А.М. Смирнова. Вып. 10. М.: МГТУ "Станкин", "Янус-К", 2004. 240 с.
8. **Колотов Ю.В.** Совершенствование привода нижней бабы бесшаботного молота с гидравлическим механизмом связи // Вестник МГТУ "Станкин". 2011. № 1 (13). С. 82— 83.

Юрий Васильевич Колотов, д-р техн. наук,
urvasi@inbox.ru;
Андрей Германович Кобелев;
Денис Сергеевич Чашкин

УДК 621.777

Н.В. Коробова, А.Ю. Аксененко
(Московский государственный технологический университет "Станкин")

Исследование операции комбинированного выдавливания в "плавающей" матрице детали типа стакан с наружным полым стержнем*

Исследовано изменение высоты стакана и длины стержня в зависимости от геометрических размеров инструмента и условий трения при комбинированном выдавливании в "плавающей" матрице. Применена комбинированная матрица плана, сочетающая в себе физические и компьютерные эксперименты при проведении исследования. Анализ построенных математических моделей операции позволил установить влияние эффекта "плавающей" матрицы при комбинированном выдавливании. Получена зависимость перемещения матрицы от толщины стенки стакана.

Ключевые слова: комбинированное выдавливание; холодная объемная штамповка; деталь типа стакан; "плавающая" матрица; активно направленные силы трения; снижение силы штамповки; управление течением.

Changes of cup height and rod length depending on tool dimension and friction condition under combined extrusion process with "sliding" die is studied. Matrix of experiment which combines physical and numerical simulation is applied. The analysis of obtained mathematical models allowed to establish the effect of "sliding" die under combined extrusion. Dependence of die movement depending on cup wall thickness is obtained.

Keywords: combined extrusion; cold volume stamping; cup formed part; sliding die; active directed friction forces; reduction of stamping force; metal flow control.

Введение. Развитие заготовительного производства требует постоянного совершенствования используемых, а также разработки новых, прогрессивных технологий получения полуфабрикатов для изготовления широкой номенклатуры деталей.

Технологии *холодной объемной штамповки* (ХОШ) позволяют получать полуфабрикаты, близкие по форме и размерам к конечному изделию, т.е. требующие минимального числа операций последующей обработки [1—3]. Одними из наиболее распространенных операций ХОШ являются операции прямого, обратного и радиального выдавливания с вытеснением металла заготовки в полость между инструментами, тем самым обеспечивая получение требуемых формы и размеров детали. Холодное выдавливание требует создания высоких удельных сил на инструменте вследствие упрочнения материала заготовки при деформировании [4].

Процесс накопления деформаций по ходу выдавливания в объеме заготовки не только способствует получению изделий с заданными механическими характеристиками, но и ограничивает возможность изготовления детали за минимальное число переходов штамповки без ее разрушения или зарождения в ней дефектов [5, 6].

Использование операций комбинированного выдавливания позволяет расширить номенклатуру деталей, изготовляемых ХОШ, повысить производительность и энергоэффективность их производства [7].

Экспериментальные исследования показали, что комбинированное выдавливание характеризуется нестационарным истечением материала в каналы штампа, эволюцией формы и размеров *очага* (*очагов*) *пластической деформации* (ОПД) по ходу выдавливания, неопределенностью получаемых размеров элементов детали, а также неустойчивостью силового режима выдавливания [8].

Эффективным способом управления напряженно-деформированным состоянием в ОПД и стабильностью геометрических размеров получаемых изделий является использование активно направленных сил контактного трения [7]. Создание таких сил трения возможно с применением специализированных гидравлических прессов, имеющих отдельные приводы матрицы, пуансона и выталкивателя [8, 9].

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, грант № СП-1443.2015.1.

В ряде случаев образование активно направленных сил контактного трения происходит при использовании незакрепленной матрицы, имеющей возможность свободно перемещаться в направлении истечения металла, так называемой "плавающей" матрицы [10]. Перемещение матрицы происходит за счет сил трения на сформированном участке заготовки, скорость перемещения которого выше скорости течения металла в ОПД. Таким образом, разница скоростей движения инструмента и течения металла в ОПД создает активно направленные силы контактного трения, способствующие интенсификации процесса выдавливания.

Рассмотрена схема комбинированного выдавливания в "плавающей" матрице с противонаправленным течением металла в коаксиальные каналы, представленная на рис. 1.

Предлагаемая схема получения полуфабриката заключается в следующем. Цилиндрическая заготовка *1* наружным радиусом R и высотой h_0 помещается на контрпуансон *3* в матрицу *5*. По оси заготовки выполнено отверстие радиусом r_0, в которое устанавливается оправка *4* диаметром $2r_0$. Оправка выполнена в виде иглы, которая располагается на оси пуансона *2* и обладает возможностью свободно перемещаться в полости пуансона.

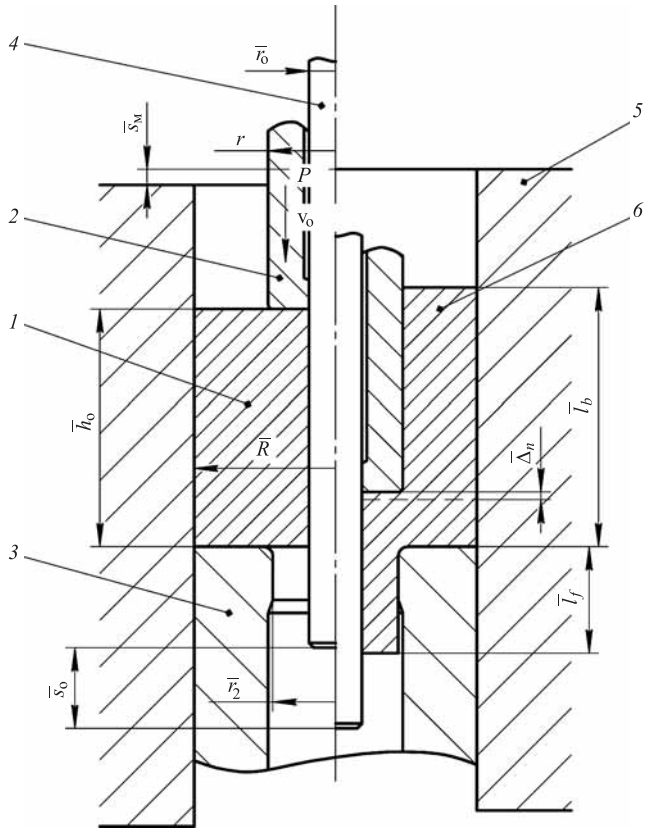


Рис. 1. Схема комбинированного выдавливания в "плавающей" матрице:

$\bar{h}_0$ — начальная высота заготовки; $\bar{R}$ — радиус матрицы; $\bar{r}_2$ — радиус стрежня; $\bar{r}_0$ — радиус оправки; $\bar{s}_м$ — перемещение матрицы; $\bar{s}_0$ — перемещение оправки; $\bar{l}_b$ — высота стакана; $\bar{l}_f$ — длина стрежня; $\bar{\Delta}_п$ — упругое восстановление после разгрузки

При движении пуансона *2* вниз со скоростью v_0 происходит вытеснение металла в зазор между пуансоном и матрицей (истечение в обратном направлении) и в зазор, образованный контрпуансоном и оправкой (истечение в прямом направлении). Происходит оформление наружной и внутренней поверхностей полого изделия.

Процесс выдавливания прекращается при достижении заданной толщины дна $h_д$, глубины стакана l_b и длины стрежня l_f. В ходе выдавливания матрица движется вверх за счет движения стенки стакана, подъем матрицы $s_м$ зависит от условий трения, контактного давления и скорости истечения металла.

Ввиду неопределенности течения материала заготовки в каналы штампа по ходу движения пуансона достижение заданных геометрических размеров l_b и l_f при заданных R, r_2, r_0, $h_д$ не всегда может быть обеспечено на требуемом уровне.

Цель работы — установление влияния геометрических размеров и условий трения на высоту стакана и длину стержня получаемого полуфабриката при комбинированном выдавливании из полой заготовки фиксированной высоты в "плавающей" матрице.

Задачами исследования являются экспериментальное установление эффекта "плавающей" матрицы при комбинированном выдавливании, выбор методики исследования для решения первой задачи с применением метода факторного планирования эксперимента, получение математической модели зависимости высоты стакана и математической модели длины стержня от геометрических размеров инструмента и условий трения.

Методика проведения исследований. Использован метод многофакторного планирования эксперимента. Факторы и уровни их варьирования приведены в табл. 1. Выбор уровней варьирования коэффициента трения (F_2) обусловлен результатами экспериментов по определению коэффициента трения методом осадки кольца.

В качестве функций отклика были выбраны параметры, представленные в табл. 2.

Высота исходной заготовки $\bar{h}_0$ и диаметр $2\bar{R}_0$ заданы постоянными $\bar{h}_0 = (25{,}2 \pm 0{,}2)$ мм и $2\bar{R}_0 = 30_{-0{,}2}$ мм. Материал заготовок — алюминиевый сплав АД1. Относительная толщина дна, при которой фиксировались значения функций отклика, принята постоянной

1. Факторы и уровни их варьирования

Фактор	Наименование	Условное обозначение	F_i		
			0	1	2
			Значение факторов X_i на уровнях варьирования в натуральном масштабе		
F_1	Относительный радиус контейнера	$R = \bar{R}/\bar{r}$	2,09	1,54	1,35
F_2	Коэффициент трения по Прандтлю (Зибелю)	m	0,15	0,3	0,45
F_3	Относительный радиус стержня	$r_2 = \bar{r}_2/\bar{r}$	0,923	0,68	0,595
F_4	Относительный радиус оправки	$r_0 = \bar{r}_0/\bar{r}$	0,391	0,494	0,545

2. Функции отклика

Отклик	Наименование	Условное обозначение	Формула
y_1	Относительная высота стенки стакана	l_b	$l_b = \bar{l}_b/\bar{r}$
y_2	Относительная длина стержня	l_f	$l_f = \bar{l}_2/\bar{r}$

$\bar{h}_д/\bar{h}_0 = 0,20$. Ход пуансона для выбранной высоты заготовок составил $\bar{s}$ = (20 ± 0,2) мм.

Для оценки влияния главных эффектов варьируемых факторов выбрана матрица плана эксперимента $3^4//9$, которая включает в себя 9 опытов, с варьированием 4 факторов на трех уровнях. В результате реализации эксперимента согласно матрице плана получили математические модели в виде уравнения регрессии

$$y_j = b_0 + \sum_{i=1}^{k} b_i X_i + \sum_{i=1}^{k} b_{ii} X_i^2, \qquad (1)$$

где y_j — функция отклика;

X_i — варьируемый фактор;

b_i — коэффициенты регрессии;

k — число варьируемых факторов.

Для обработки экспериментальных данных и последующего регрессионного анализа совершен переход к кодированному масштабу, в котором матрица плана симметрична и ортогональна. В табл. 3 приведена полная матрица

3. План эксперимента в натуральном и кодированном масштабах

Номер опыта	В натуральном масштабе				В кодированном масштабе							
	F_1	F_2	F_3	F_4	x_1	x_2	x_3	x_4	z_1	z_2	z_3	z_4
	X_1	X_2	X_3	X_4								
1	0	0	0	0	4,3	−1,5	1,9	−0,86	1,66	0,75	0,33	0,11
	2,09	0,15	0,923	0,391								
2	1	0	1	1	−1,2	−1,5	−0,53	0,17	−6,46	0,75	−1,28	−0,34
	1,54	0,15	0,68	0,494								
3	2	0	2	2	−3,1	−1,5	−1,38	0,68	4,80	0,75	0,95	0,23
	1,35	0,15	0,595	0,545								
4	0	1	1	2	4,3	0	−0,53	0,68	1,66	−1,50	−1,28	0,23
	2,09	0,3	0,68	0,545								
5	1	1	2	0	−1,2	0	−1,38	−0,86	−6,46	−1,50	0,95	0,11
	1,54	0,3	0,595	0,391								
6	2	1	0	1	−3,1	0	1,9	0,17	4,80	−1,50	0,33	−0,34
	1,35	0,3	0,923	0,494								
7	0	2	2	1	4,3	1,5	−1,38	0,17	1,66	0,75	0,95	−0,34
	2,09	0,45	0,595	0,494								
8	1	2	0	2	−1,2	1,5	1,9	0,68	−6,46	0,75	0,33	0,23
	1,54	0,45	0,923	0,545								
9	2	2	1	0	−3,1	1,5	−0,53	−0,86	4,80	0,75	−1,28	0,11
	1,35	0,45	0,68	0,391								

плана эксперимента в натуральном и кодированном масштабах.

Впервые реализован эксперимент, в котором часть опытов матрицы плана выполнены в виде физического эксперимента, а остальные опыты — в виде компьютерного эксперимента с применением моделирования в программе DEFORM-2D ver.10.2. Матрица плана, сочетающая в себе компьютерный и физический эксперименты, названа комбинированной матрицей плана эксперимента (комбинированной матрицей).

Подготовку и проведение компьютерных экспериментов осуществляли в соответствии с разработанной авторами статьи методикой, включающей в себя экспериментальное определение коэффициента трения для используемых смазочных материалов в паре трения заготовка—инструмент и экспериментальное построение кривой упрочнения материала заготовки.

Моделирование методом конечных элементов проводили, принимая следующие допущения: задача осесимметричная; материал заготовки изотропен; модель заготовки — жесткопластическая с нелинейным упрочнением; инструмент — абсолютно жесткое тело; трение на контактных поверхностях пропорционально постоянной пластичности k; число конечных элементов ~5000 ед.

Кривая упрочнения материала получена путем аппроксимации экспериментальных данных зависимостью вида

$$\sigma_s = \sigma_0 + Ke_i^n, \qquad (2)$$

где σ_0 = 80 МПа — предел текучести материала;

K = 119 — коэффициент упрочнения;

n = 0,32 — показатель степени; e_i — интенсивность деформаций.

Матрицу при моделировании задали подвижной, массой 12 кг, трением между инструментами пренебрегали.

Физические эксперименты выполняли на универсальной испытательной машине INSTRON 5989 (США) силой 600 кН и открытой высотой рабочего пространства 700 мм. Заготовки были отрезаны от прутка на универсальном отрезном станке Discotom-6 фирмы Struers (Дания). Отверстия по оси заготовок просверлены на универсальном токарно-винторезном станке 16К20 (РФ). В качестве смазочных материалов применяли приборную смазку Циатим-201 и экспериментальную смазочную пасту на ее основе с наполнителем из дисульфида молибдена.

Опыты с первого по третий были проведены повторно по 4 раза. По результатам дублирования были рассчитаны дисперсии воспроизводимости опытов. Однородность ряда дисперсий проверяли по критерию Кохрена, а статистическую значимость коэффициентов регрессии — исходя из равномерного дублирования. Дисперсии оценок коэффициентов математических моделей рассчитывали в соответствии с методом регрессионного анализа.

Доверительные интервалы коэффициентов регрессии были рассчитаны при уровне значимости 10 % и значении t-критерия Стьюдента 1,94. Коэффициенты, значение которых оказалось меньше доверительного интервала, были признаны статистически незначимыми и исключены из уравнений.

Оценку адекватности построенных после преобразований математических моделей выполняли по критерию Фишера (F-критерию) при уровне значимости 5 %. Если при сравнении расчетных и табличных значений критерия Фишера выполняется условие $F^{\text{расч}} < F^{\text{табл}}$, то гипотеза об адекватности всех моделей на 5%-ном уровне значимости подтвердится. Для обработки значений использована программа Microsoft Office Excel 2007, преобразование моделей из кодированного масштаба в натуральный выполняется с помощью программы MathCAD ver.14.

Результаты исследований и их обсуждение. После реализации и обработки результатов эксперимента получены следующие математические модели:

$$l_b = 10{,}929 + 1{,}232R + 5{,}44m^2 - 3{,}828m - 2{,}024r_2 + 35{,}054r_0^2 - 32{,}552r_0; \qquad (3)$$

$$l_f = 5{,}957 + 1{,}037R^2 - 4{,}289R - 4{,}289m + 1{,}264r_2 - 3{,}597r_0. \qquad (4)$$

Используя модели (3) и (4), построены зависимости относительных геометрических размеров элементов детали от варьируемых параметров. Зависимости представлены на рис. 2—5. Каждый рисунок содержит три кривые, рассчитанные для двух варьируемых факторов при фиксированных уровнях остальных. Анализ полученных зависимостей и их графиков показал следующее.

Варьирование радиуса R позволяет существенно влиять на конечные размеры получаемых элементов деталей. В диапазоне $1{,}3 \leqslant R \leqslant 2{,}09$ с увеличением радиуса матрицы происходит линейный рост высоты стенки l_b на 29...32 % от минимума (см. рис. 2, *а*). Это объясняется начальным отношением высоты заготовки h_0 к радиусу пуансона r.

Диапазон изменения длины стрежня с увеличением радиуса матрицы несколько меньше и составляет примерно 25...30 % (см. рис. 2, *б*). С увеличением толщины стенки происходит

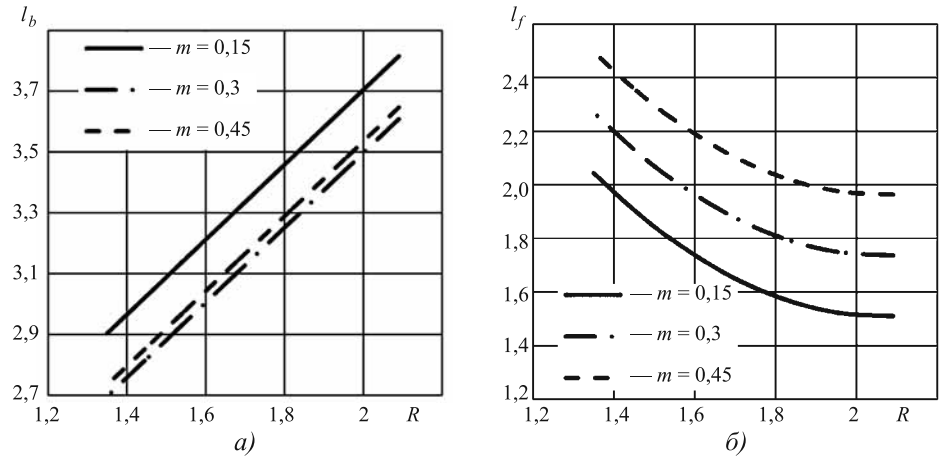


Рис. 2. Зависимость относительной высоты стенки стакана l_b (*а*) и относительной длины стержня l_f (*б*) от относительного радиуса матрицы R и коэффициента трения m при r_0 = 0,391 и r_2 = 0,923

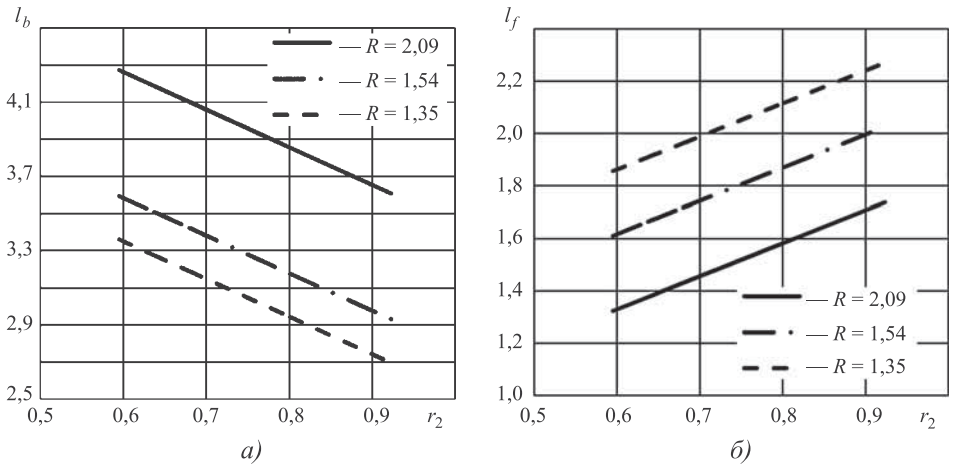


Рис. 3. Зависимость относительной высоты стенки стакана l_b (*а*) и относительной длины стержня l_f (*б*) от относительного радиуса стержня r_2 и относительного радиуса матрицы R при r_0 = 0,391 и m = 0,3

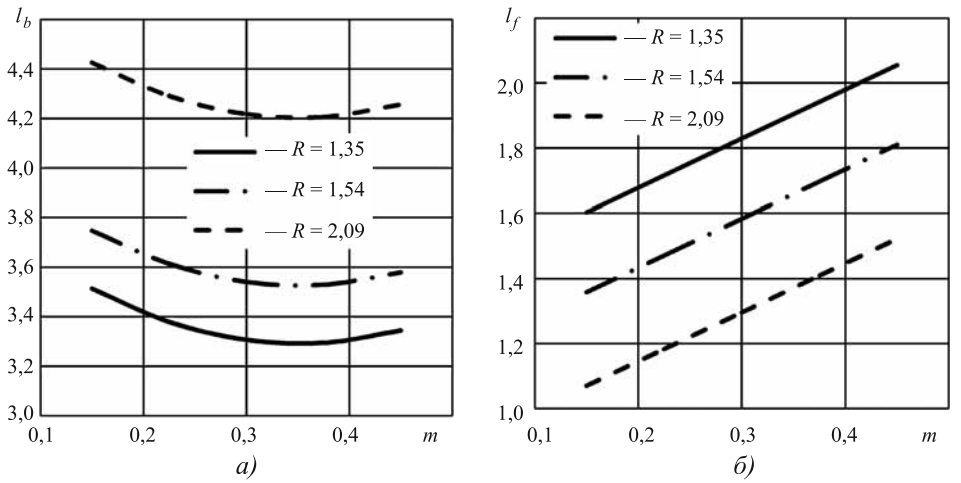


Рис. 4. Зависимость относительной высоты стенки стакана l_b (*а*) и относительной длины стержня l_f (*б*) от коэффициента трения m и относительного радиуса матрицы R при r_0 = 0,4 и r_2 = 0,6

уменьшение длины стержня l_f, что объясняется снижением сопротивления течению в стенку стакана, приводящее к менее интенсивному течению металла в стержень.

Утолщение стенки стержня ведет к уменьшению высоты стенки стакана l_b (см. рис. 3, *а*). Увеличение радиуса стержня r_2 от 0,39 до 0,92 ведет к линейному снижению высоты стенки стакана на 15...20 %. Это объясняется снижением сопротивления течению металла в стержень и перераспределением объема металла, что ведет к уменьшению высоты стенки l_b. Подтверждением этому является увеличение длины стержня l_b (см. рис. 3, *б*). Увеличение радиуса стержня r_2 от 0,39 до 0,92 ведет к росту высоты стенки стержня на 25...35 %.

Влияние сил трения на размеры получаемого изделия демонстрируют кривые, показанные на рис. 4. На рис. 4, *а* заметно наличие минимума относительной высоты стенки стакана при значениях коэффициента трения около 0,35. Уменьшение трения увеличивает высоту выдавливаемого стакана на 3...6 %, а увеличение трения в исследуемых пределах сопровождается ростом не более 2...5 %.

С точки зрения управления конечным формоизменением условия трения обладают большим потенциалом в отношении длины стержня, что показано на рис. 4, *б*. Применение смазочных материалов, обеспечивающих большее значение коэффициента трения на контактных поверхностях до m = 0,4...0,45, позволяет увеличить длину l_f на 40...50 %. Повышение трения сопровождается увеличением со-

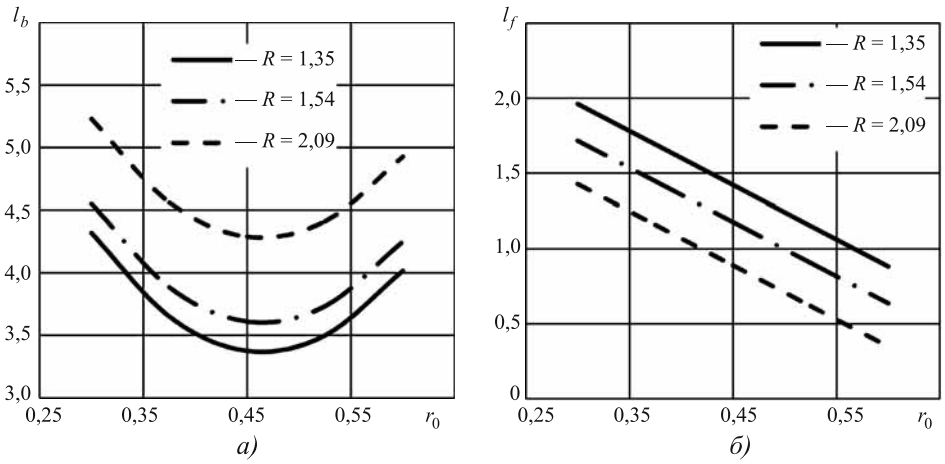


Рис. 5. Зависимость относительной высоты стенки стакана l_b (*а*) и относительной длины стержня l_f (*б*) от радиуса оправки r_0 и относительного радиуса матрицы *R* при m = 0,15 и r_2 = 0,6

противления течению в стенку стакана, за счет этого металл интенсивнее течет в стержень. Эксперимент был поставлен с использованием "плавающей" матрицы, поэтому данный эффект может быть усилен при использовании принудительно перемещаемой матрицы.

Изменение радиуса оправки r_0 в пределах варьирования при фиксированном радиусе стержня имеет нелинейное влияние на высоту стенки стакана l_b (рис. 5, *а*). При значениях r_0 = 0,45...0,47 высота стакана достигает минимальных значений при любой толщине стенки. Уменьшение r_0 сопровождается ростом высоты стенки стакана на 24...35 %, в то время как увеличение радиуса оправки приводит к менее заметному росту l_b на 11...15 % относительно минимальной высоты. Это происходит в результате перераспределения течения металла в очаге пластической деформации в стенку стакана и стержня.

Варьированием r_0 можно добиться существенного увеличения относительной длины стержня. При уменьшении радиуса оправки от максимального (r_0 = 0,6) до минимального (r_0 = 0,3) длина стержня l_f практически линейно возрастает в 2,5 раза, что также является следствием изменения течения металла в очаге пластической деформации за счет уменьшения сопротивления течению в стержень при увеличении его толщины стенки.

При выполнении физических экспериментов согласно матрице плана был отмечен эффект "подъема" матрицы во время выдавливания (на рис. 1 обозначен как $s_м$). Величина $s_м$ оказалась различной (рис. 6). Незакрепленная матрица перемещается под действием активных сил трения. Закономерность перемещения "плавающей" матрицы при выполнении по ходу выдавливания имеет сложный нелинейный характер. Величина подъема матрицы в конце хода пуансона при разгрузке системы "заготовка—инструмент—машина" имеет зависимость от различных факторов, определение этой зависимости является задачей дальнейших исследований.

На рис. 7 представлен график зависимости относительного подъема матрицы в конце хода пуансона от относительного радиуса матрицы (толщины стенки стакана). Снижение подъема матрицы с увеличением толщины стенки стакана можно объяснить уменьшением относительной скорости течения металла в стенку стакана, а также снижением интенсивности течения в результате повышения интенсивности течения в стержень при заданном сочетании уровней варьируемых факторов. Установление закона изменения скорости движения матрицы под действием сил трения позволит оптимизировать закон принудительного перемещения матрицы,

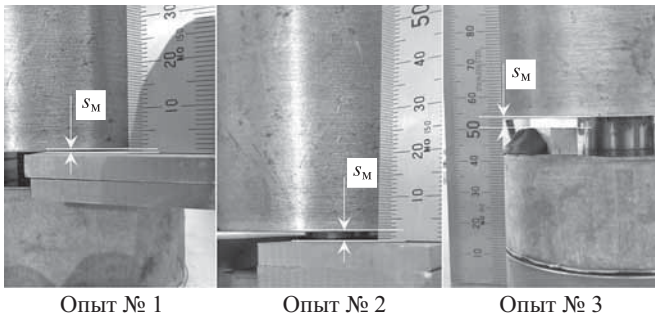


Рис. 6. Подъем "плавающей" матрицы в конце выдавливания

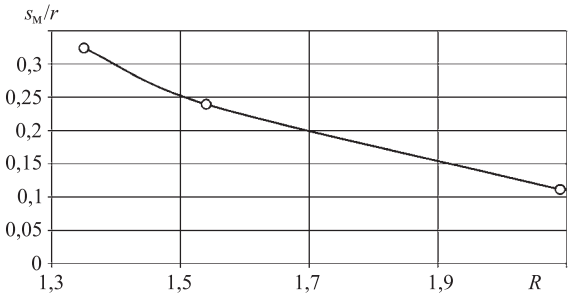


Рис. 7. Зависимость относительного подъема матрицы от относительного радиуса матрицы

обеспечив постоянный уровень превышения скорости матрицы над скоростью истечения металла.

Полученные результаты доказывают наличие эффекта действия активно направленных сил трения при выдавливании в "плавающей" матрице.

Заключение. Комбинированное выдавливание обладает значительным потенциалом для получения качественного полуфабриката холодной штамповкой за один переход. Исследования позволили получить математические модели относительных высоты стенки стакана и длины стержня в виде уравнений регрессии при выдавливании в плавающей матрице из полых заготовок с отношением $h_0/D_0 = 0{,}84$.

Впервые применен метод факторного планирования эксперимента с матрицей плана, сочетающей в себе физический и компьютерный эксперименты. Установлено, что размеры получаемого полуфабриката зависят от соотношения толщины стенки стакана ($R - 1$) и стенки стержня ($r_2 - r_0$). Варьирование этих толщин позволяет изменить размеры получаемых полуфабрикатов на 11...35 %. Управление силами трения за счет применения различных смазочных материалов позволяет увеличить длину стержня на 40...50 %, что в сочетании с выбором требуемой толщины стенки стержня/стакана позволяет управлять размерами конечного изделия.

Экспериментально показан эффект "плавающей" матрицы при комбинированном выдавливании осесимметричных полуфабрикатов с противонаправленным истечением материала в коаксиальные каналы. Полученные математические модели имеют практическое значение и могут применяться при проектировании процессов комбинированного выдавливания из полых заготовок в "плавающей" матрице осесимметричных деталей типа стакан с наружным полым стержнем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Практическое** использование изменения механических характеристик конструкционных углеродистых сталей при холодной объемной штамповке / А.М. Дмитриев, Ф.В. Гречников, Н.В. Коробова, Н.С. Толмачев // Вестник МГТУ "Станкин". 2014. № 4 (31). С. 41—44.

2. **Разработка** инновационной технологии штамповки полой насосной штанги для нефтяных скважин / А.Э. Артес, А.М. Володин, Е.Н. Сосенушкин, В.В. Третьюхин // Вестник МГТУ "Станкин". 2011. № 2. С. 18—21.

3. **Пузырь Р.Г., Сосенушкин Е.Н., Яновская Е.А.** Установление поля напряжений при радиально-ротационном профилировании цилиндрической заготовки без учета радиусов закругления деформирующего инструмента // Вестник МГТУ "Станкин". 2013. № 4 (27). С. 42—47.

4. **Дмитриев А.М., Коробова Н.В., Толмачев Н.С.** Экспериментальная проверка результатов компьютерного моделирования напряжений на элементе деформирующего инструмента // Вестник МГТУ "Станкин". 2014. № 2 (29). С. 44—49.

5. **Бильчук М.В., Сосенушкин Е.Н.** Прогнозирование образования поверхностных дефектов фланцевой части поковок при горячей объемной штамповке // Вестник МГТУ "Станкин". 2012. № 4 (23). С. 44—48.

6. **Сосенушкин Е.Н.** Штамповка кристаллизующегося металла // Вестник МГТУ "Станкин". 2010. № 2. С. 12—20.

7. **Аксененко А.Ю., Коробова Н.В., Дмитриев А.М.** Анализ различных методов разработки процесса изготовления корпусных деталей комбинированным выдавливанием // Компьютерные исследования и моделирование. 2014. Т. 6. № 6. С. 967—974.

8. **Отечественное** развитие и решение проблемы штамповки полых деталей цилиндрической формы, имеющих конический придонный участок / А.М. Дмитриев, Н.В. Коробова, Н.С. Толмачев, А.Ю. Аксененко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. № 10-2. С. 3—17.

9. **Технологичность** конструкций создаваемых малогабаритных специализированных прессов / А.М. Дмитриев, Н.В. Коробова, А.Ю. Аксененко, Н.С. Толмачев // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 11 (148). С. 3—9.

10. **Дмитриев А.М., Коробова Н.В., Петров М.Д.** Разработка технологии производства корпуса гидроцилиндра из железного порошка // Вестник МГТУ "Станкин". 2014. № 1 (28). С. 54—58.

Наталья Васильевна Коробова, д-р техн. наук,
mt-6@yandex.ru;
Анатолий Юрьевич Аксененко

УДК 621.735

В.В. Емельянов *(ФГУП "НПО "Техномаш", г. Москва)*,
Е.Н. Сосенушкин *(Московский государственный технологический университет "Станкин")*

Технические требования и режимы прокатки биметаллических листов для изготовления из них изделий способом ротационной вытяжки

Рассмотрены требования к биметаллическим листам, полученным прокаткой с диффузионным образованием промежуточного слоя интерметаллидов. Представлены результаты компьютерного и физического моделирования процесса ротационной вытяжки плоских заготовок из биметаллического литья с принудительным утонением стенки изделия. Согласно критерию разрушения ресурс пластичности биметалла исчерпывается на 50 %.

Ключевые слова: прокатка; биметалл; технические требования; ротационная вытяжка; осесимметричные оболочки; изменение толщины; компьютерное моделирование; эксперимент.

Specifications for bimetal sheets manufactured by rolling with diffusive cavitation of inetermediate layer of intermetallic compound are discussed. The results of computer and physical modeling of rotary drawing of slab billets from bimetal sheet with product's forced reduction in metal thickness are presented. According to fracture criterion the bimetal plasticity resource expires at 50 %.

Keywords: rolling; bimetal; specifications; rotary drawing; axisymmetrical shell; thickness variation; computer modeling; experiment.

Современные темпы развития различных отраслей промышленности предъявляют высокие требования к качеству и эксплуатационным свойствам конструкций и изделий [1]. В зависимости от назначения изделия, в том числе и полые оболочки, можно изготовлять из различных материалов: чугуна [2], стали [3], цветных металлов.

Однако существуют условия, при работе в которых изделия должны обладать несовместимыми физико-механическими свойствами — высокая прочность и низкая плотность, коррозионная стойкость и износостойкость, соединение деталей из практически несвариваемых металлов и т.п. Анализ современного производства позволил установить, что приведенным набором свойств в полной мере обладают многослойные материалы (биметаллы, триметаллы и т. д.). Данная категория материалов дает возможность получения путем подбора металла слоев такого сочетания свойств, которыми не обладает ни один монометалл.

Наиболее распространенными осесимметричными оболочковыми деталями, получаемыми из монометаллов [4], порошковых заготовок и слоистых полуфабрикатов методами обработки давлением, являются емкости, баллоны высокого давления, днища, сопла летательных аппаратов, корпуса центрифуг и сепараторов, переходники конической, цилиндрической и более сложной формы [5] для соединения трубопроводов и т.д.

Обработка таких многослойных композиций металлов методами пластической деформации сопряжена с рядом трудностей. В основном это связано с тем, что металлы, входящие в состав многослойной композиции, обладают резко отличающимися пластическими свойствами. Это требует поиска компромиссного решения технологической задачи по обработке материалов данного класса.

Алюминий с железом способен давать твердые растворы, интерметаллидные соединения (Fe_2Al_4—62,93 % Al; Fe_2Al_5— 54,71 % Al; $FeAl_2$ —49,13 % Al; FeAl —32,57 % Al и др.) и эвтектику (Al + $FeAl_3$, температура плавления 654 °С, содержание железа в металле 1,8 %). Растворимость железа в твердом состоянии невелика и составляет 0,053 % при эвтектической температуре. Растворимость алюминия в железе гораздо выше и равна 32 % [6].

Характер диффузионных процессов при соединении (сварке) в твердой фазе алюминия с железом из соединяемой стали на начальной стадии взаимодействия и в дальнейшем отличается.

В начальный период преобладает диффузия железа в алюминий, что способствует образова-

нию в пограничной зоне слоя из совокупности фаз $FeAl_3$+Fe_2Al_5. При достижении температуры рекристаллизации стали наблюдается интенсивная диффузия алюминия в сталь. Скорость процесса зависит от химического состава материала контактирующих заготовок и условий нагрева. Для твердофазного взаимодействия при определенных температурно-временных условиях, в которых проводится соединение (сварка), может отсутствовать сплошной фронт интерметаллидов.

Реакционная диффузия в системе алюминий—железо наблюдается при температуре выше 400 °С. Рост интерметаллидного слоя подчиняется параболическому закону: $h^2 = 2k_1\tau$, где k_1 — величина, пропорциональная коэффициенту диффузии алюминия через слой; τ — время процесса [6].

Легирование материалов алюминиевой заготовки Si, Mn и другими элементами, а стали — V, Ti, Si и Ni ведет к повышению энергии активации реакционной диффузии. Их влияние связано с затруднением образования зародышей в промежуточной фазе. Наоборот, C и Mn в стали снижают энергию активации. Повышенное содержание в стали свободного кислорода и азота ведет к увеличению температуры начала образования интерметаллидов.

Возникновение интерметаллидного слоя для каждой температуры начинается после некоторого критического времени, т. е. имеет место латентный период (τ_0), по истечении которого происходит интенсивное образование интерметаллидов. При соединении хромоникелевых коррозионностойких сталей с алюминиевыми сплавами интерметаллидная прослойка имеет сложный состав, а в ее образовании участвуют Cr и Ni [6].

Биметаллическое соединение имеет удовлетворительные механические свойства только до образования сплошного слоя интерметаллидной фазы. Работоспособность соединения сохраняется при определенном температурно-временном воздействии. Верхний температурный порог для биметаллических изделий из рассматриваемого сочетания материалов составляет 500... 520 °С.

Основными путями получения работоспособного соединения алюминиевых сплавов со сталями являются следующие:

- ограничение протяженности слоя интерметаллидных прослоек, высокая прочность может быть получена при ширине зоны 10 мкм;
- легирование алюминия элементами, сдерживающими образование промежуточной фазы, прежде всего кремнием, а также применение стали с низким содержанием углерода и марганца, что позволяет поднять температуру образования интерметаллидов на 40...60 °С выше температуры рекристаллизации стали. Этот путь можно использовать при соединении (сварке) в твердой фазе [6].

Основным процессом получения биметаллических листов с компонентами 12Х18Н10Т + АМг6 является прокатка, которая позволяет регламентировать температуру нагрева зоны соединения. Это достигается захолаживанием алюминиевой составляющей до температуры (0,70...0,77) температуры прокатываемого пакета. В табл. 1 [7] приведены технологические параметры процесса прокатки для получения биметаллических листов без дефектов.

В результате прокатки в зоне контакта двух разнородных материалов образуется интерметаллидная зона толщиной 6...8 мкм. Эта зона характеризуется пониженными пластическими свойствами и завышенными значениями микротвердости.

Для улучшения соединения двух слоев используют прослойку из алюминия марки АД0, толщина которой составляет 0,5...1,0 мм. Также необходимо чтобы толщина пакета биметалла была намного больше толщины промежуточной зоны прослойки АД0 и интерметаллидной зоны. Параметр шероховатости *Ra* со стороны слоя АМг6 должен быть не более 2 мкм, при этом риски, забоины и другие дефекты глубиной более 0,1 мм не допускаются.

В последнее время все более востребованными становятся процессы пластического формоизменения с локальным очагом деформации [8], к которым относится ротационная вытяжка. Несмотря на то что процесс ротационной вытяжки известен еще с давних времен, интерес к нему в настоящее время вызван, прежде всего, в связи с развитием компьютерного моделирования на основе метода конечных элементов, а также гибкостью и достаточно высокой степенью автоматизации процесса с применением систем ЧПУ, простотой конструкции и универсальностью деформирующего инструмента, в меньшей степени подверженного износу.

В отечественных и иностранных источниках широко описано применяемое конечно-элементное моделирование процесса ротационной вытяжки, реализуемое в различных коммерческих CAE-системах [9]. При этом получена хорошая сходимость результатов компьютерного моделирования и экспериментов. Поэтому использование современных методов в области конечно-элементного анализа делает решение задачи исследования процесса ротационной вытяжки многослойных материалов актуальной. Применение программы DEFORM-2D для решения практических задач пластической деформации многослойных материалов показало адекватные результаты с допустимой погрешностью по сравнению с физическим экспериментом.

В работе проведено компьютерное и физическое моделирование процесса ротационной вытяжки на конической оправке с углом конуса 70°.

1. Технологические параметры прокатки биметалла 12Х18Н10Т + АМг6

Температура, °С			Пластичность, %		$\frac{\delta_1}{\delta_2}$	$\frac{T_1}{T_2}$	Выход годного, %	Виды дефектов
пакета биметалла	слоев							
	T_1	T_2	δ_1	δ_2				
	АМг6	12Х18Н10Т	АМг6	12Х18Н10Т				
380	285	380	52	48	1,08	0,75	71	Отсутствуют

Числовой расчет осуществляли для биметаллического материала 12Х18Н10Т + АМг6 с суммарной толщиной пакета 10 мм и толщиной входящих слоев: 12Х18Н10Т — 4,5 мм; АМг6 — 5,5 мм; диаметр заготовки 140 мм. Скорость перемещения ролика постоянная, 1 мм/с.

При рассмотрении механической схемы деформации (рис. 1) отношение первоначальной толщины заготовки t_0 к конечной толщине стенки конуса t_1 при половине центрального угла конуса α определяется выражением [10]:

$$t_1 = t_0 \sin\alpha. \quad (1)$$

Данное соотношение принято за основу при расчете толщин слоев получаемого конуса из биметалла. Согласно (1) толщина каждого слоя материала после раскатки на конической оправке должна составлять:

— для 12Х18Н10Т t_1 = 2,58 мм;

— для АМг6 t_1 = 3,15 мм.

При моделировании заготовка принята идеально пластичной, а инструмент идеально жестким. В программу DEFORM-2D механические свойства материалов каждого слоя биметалла были заданы из диаграммы растяжения, полученной в результате проведения в лаборатории механических испытаний образцов, изготовленных из каждого слоя исходного биметалла.

При ротационной вытяжке деформация заготовки принята как плоская с осевой симметрией. Число элементов по толщине каждого слоя не менее 5, число элементов для каждого слоя 3000.

Напряжения относительного сдвига, действующие по поверхности контакта слоев, не превышают прочности их сцепления (относительный сдвиг отсутствует). На поверхности контакта ролика и заготовки действуют касательные напряжения, определяемые по гибридному закону (по закону Кулона коэффициент трения принят равным 0,03, по Зибелю 0,12). Наружный слой получаемого конуса из материала 12Х18Н10Т, внутренний слой из АМг6.

На рис. 2, *а* представлены результаты моделирования процесса ротационной вытяжки с указанием участков измерения толщин на конической образующей заготовки. Аналогично после экспериментального проведения ротационной вытяжки заготовок на специализированном стане выполнены измерения толщины стенки полученной конической заготовки (рис. 2, *б*).

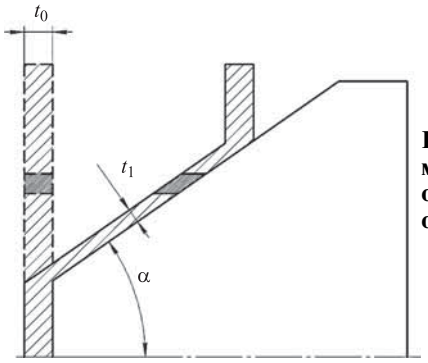


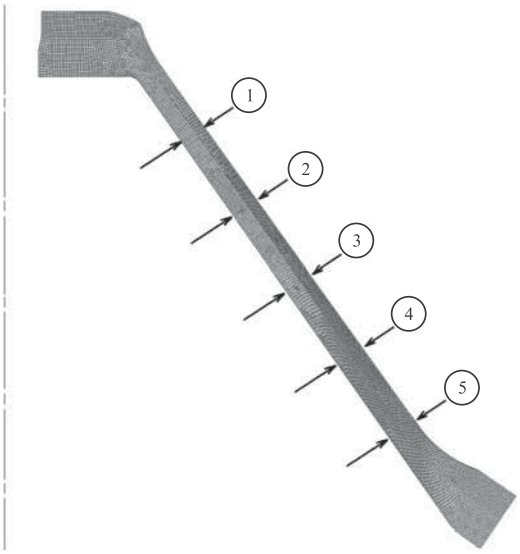
Рис. 1. Схема деформации в процессе обкатки конусов на оправке

Распределение толщины слоев биметалла по результатам измерения компьютерной и натурной моделей приведено в табл. 2.

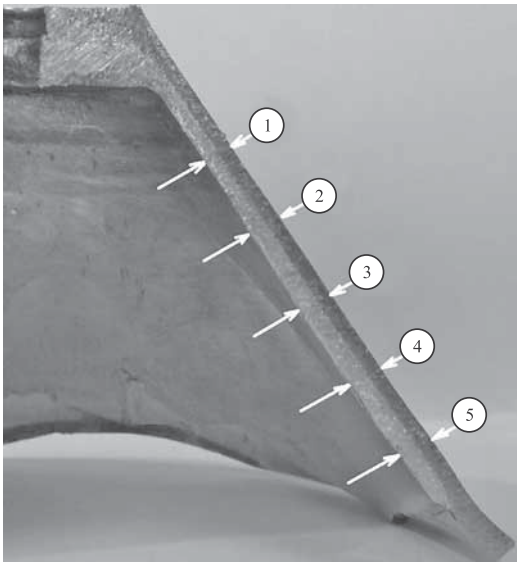
По результатам измерения толщин погрешность моделирования от эксперимента составила не более 10 %, что является хорошим показателем сходимости.

После каждого перехода процесса ротационной вытяжки относительный сдвиг слоев не должен превышать 0,6 мм, при этом суммарное смещение на всех переходах не должно превышать 2 мм (ОСТ 92 8629—75).

На рис. 3 (см. обложку) показано распределение численного значения модифицированного критерия разрушения Кокрафта—Латама. Из результатов моделирования следует, что критерий



а)



б)

Рис. 2. Результаты измерения толщины заготовки после компьютерного моделирования (*а*) и натурного эксперимента (*б*)

2. Распределение толщин слоев биметалла АМг6/12Х18Н10Т, мм

Моделирование	Толщина стенки каждого слоя материала, мм				
	1	2	3	4	5
Компьютерное	3/2,4	3/2,5	3,1/2,5	3,1/2,5	3,1/2,5
Физическое	3,1/2,85	3,15/2,86	3,15/2,85	3,15/2,85	3,2/2,87

разрушения при ротационной вытяжке конической детали не достигает критической для стали и алюминия величины (≈1), судя по максимальным значениям критерия, ресурс пластичности исчерпывается на 50 %.

Однако имеется существенное различие в результатах моделирования и эксперимента, заключающееся в разной форме фланцевого участка компьютерной модели (см. рис. 3) и получившейся заготовке (см. рис. 2, *б*). Причина данного различия связана с возникновением объемной схемы деформации в данной области, которую невозможно реализовать в плоской постановке рассматриваемой задачи. Однако это не имеет существенного значения, так как это зона припуска, которая в дальнейшем подлежит обрезке.

Распределение тангенциальных, радиальных напряжений и в направлении толщины заготовки изображено на рис. 4 (см. обложку).

Анализ напряженного состояния компьютерного моделирования показал, что в зоне пластической деформации, расположенной под роликом, локализуется очаг всестороннего сжатия, что характерно для процесса ротационной вытяжки и подтверждено в работе [11]. Составляющие полного напряжения в наклонной площадке (коническая образующая заготовки) определяются через напряжения в координатной площадке (система координат Z, R) и направляющие косинусы наклонной площадки, в данном случае угол наклонной площадки составляет 35° — половина центрального угла конуса оправки.

Степень накопленной деформации представлена на рис. 5 (см. обложку). Результаты показали равномерность распределения накопленной деформации по толщине биметалла, что является благоприятным фактором для протекания процесса формообразования без разрушения.

Выводы

1. На этапе получения биметаллических листов прокаткой необходимо соблюдать ряд требований к толщинам соединяемых слоев, промежуточного слоя из АД0 и получаемой интерметаллидной прослойки; к температурам прокатываемого пакета и алюминиевого слоя; параметрам шероховатости слоев. При ротационной вытяжке конической оболочки с утонением стенки из плоской биметаллической заготовки суммарный относительный сдвиг слоев не должен превышать предельного значения, определенного отраслевым стандартом.

2. Сопоставление результатов распределения толщин слоев биметалла после физического и компьютерного моделирования показало их удовлетворительную сходимость, что говорит о достоверности разработанной компьютерной модели, которую можно применять для первичной оценки изменения толщины слоев конических поверхностей изготовляемых полых деталей.

3. Выявлено знакопеременное распределение напряжений по сечению заготовки. Для очага, расположенного под роликом, характерна область всестороннего сжатия, что повышает устойчивость протекания процесса пластической деформации.

4. Применение компьютерного моделирования позволило оценить ресурс пластичности слоев биметалла изготовляемой детали.

5. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о возможности использования программы DEFORM-2D для анализа процесса ротационной вытяжки в части кинематики течения металла, уровня напряжений и деформаций, а также для оценки возможности послойного исчерпания ресурса пластичности биметалла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Сосенушкин Е.Н.** Развитие систем пластического деформирования // Вестник МГТУ "Станкин". 2010. № 1. С. 30—38.
2. **Пономарев А.С., Сосенушкин Е.Н., Артес А.Э.** Технология обжима трубных заготовок из чугуна ВЧ-40 // Вестник МГТУ "Станкин". 2011. № 4 (16). С. 43—45.
3. **Влияние** обработки давлением на микроструктуру и качество изделий из высокопрочного чугуна / Е.Н. Сосенушкин, А.С. Пономарев, А.Э. Артес, В.Н. Климов // Вестник МГТУ "Станкин". 2011. № 3 (15). С. 115—120.
4. **Трубные** заготовки: технологический аспект раздачи и обжима / Е.Н. Сосенушкин, А.Э. Артес, Е.А. Яновская, Д.В. Хачатрян // Вестник МГТУ "Станкин". 2010. № 4 (12). С. 36—41.
5. **Непершин Р.И.** Раздача тонкостенной трубы криволинейным жестким пуансоном // Вестник МГТУ "Станкин". 2009. № 4 (8). С. 54—60.
6. **http://www.autowelding.ru/publ/1/1/svarka_stali_s_aljuminiem_i_aljuminievymi_splavami/2-1-0-212/**
7. **Пат. 2492034 РФ.** Способ изготовления биметаллических листов и плит / Я.Л. Соломоник, Е.М. Миклашевич, Ю.А. Пискарев. 10.09.2013, Бюл. № 25.
8. **Сосенушкин Е.Н., Пузырь Р.Г., Яновская Е.А.** Установление поля напряжений при радиально-ротационном профилировании цилиндрической заготовки без учета радиусов закругления деформирующего инструмента // Вестник МГТУ "Станкин". 2013. № 4 (27). С. 42—47.
9. **Mori K., Nonaka T.** Simplified Three-Dimensional Finite Element Simulation of Shear Spinning Process Based on Axisymmetric Modeling // Journal of Manufacturing Processes. 2005. Vol. 7. № 1. P. 51—56.
10. **Ma F., Yang H., Zhan M.** Plastic deformation behaviors and their application in power spinning process of conical parts with transverse inner rib // Journal of Materials Processing Technology. 2010. Vol. 210. P. 180—189.
11. **Bai Q., Yang H., Zhan M.** Finite element modeling of power spinning of thinwalled shell with hoop inner rib // Transactions of Konferrous Metals Society China. 2008. Vol. 18. P. 6—13.

Вадим Викторович Емельянов;
Евгений Николаевич Сосенушкин, д-р техн. наук,
sen@stankin.ru

УДК 621.74.043.2

Н.В. Коробова, А.Ю. Аксененко, В.И. Лузгин*, В.Э. Фризен*, С.Ю. Шевченко
(Московский государственный технологический университет "Станкин",
**Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург)*

Эволюция микроструктуры литейных алюминиевых сплавов при гидродинамическом воздействии электромагнитных полей на расплав

Приведены результаты экспериментальных исследований заготовок с глобулярной структурой из литейных алюминиевых сплавов, полученных в процессе кристаллизации с гидродинамическим воздействием на расплав бегущего магнитного поля. Показаны основные закономерности изменения структуры при различных условиях воздействия, разливки и скорости охлаждения. Исследования микроструктуры позволили провести качественную и количественную оценку зерен α-фазы и пористости в экспериментальных тиксозаготовках.

Ключевые слова: глобулярная микроструктура; кристаллизация; пористость; тиксолитье; фактор формы; электромагнитное перемешивание.

The results of experimental studies of workpieces with globular structure from cast aluminum alloys obtained in the crystallization process with the hydrodynamic effect of circulating magnetic field on the melt are considered. The main laws of structure variation under different conditions of exposure, casting and cooling rate are presented. Studies of microstructure allow to make qualitative and quantitative evaluation of the grains of α-phase and porosity in the experimental thixocastings.

Keywords: globular microstructure; crystallization; porosity; thixocasting; form factor; electromagnetic stirring.

Развитие современных технологий заготовительного производства сопряжено с разработкой не только новых методов обработки, но и материалов с заданными свойствами.

Перспективными технологиями получения фасонных изделий с повышенными механическими характеристиками являются технологии формообразования в твердожидком состоянии, так называемые тиксоштамповка, тиксо- и реолитье [1]. Технологии базируются на эффекте тиксотропности суспензии — резкого понижения вязкости при росте интенсивности сдвига.

Одним из технологических требований к применяемым материалам является диапазон температур устойчивого наличия твердой и жидкой фаз заданного соотношения в расплаве, а также морфология структурных составляющих. В легких литейных сплавах, а также композиционных материалах на их основе эффект тиксотропности в диапазоне температур между линиями солидуса и ликвидуса достигается при сфероподобной форме зерен α-фазы нагреваемых заготовок (глобулярности).

Заготовки с заданной глобулярной структурой на этапе металлургического передела получают различными способами [2]. Наиболее перспективным в промышленности является применение схем кристаллизации с воздействием магнитных полей на расплав [3]. Новый этап развития данного способа получил начало с разработкой и серийным выпуском турбоиндукционных плавильно-заливочных агрегатов, а также комплекса для тиксолитья на их основе [4—10].

Исследование проводили в рамках отработки технологических режимов получения фасонных отливок методом тиксолитья из алюминиевых сплавов с использованием комплекса для тиксолитья на базе турбоиндукционных печей.

Цель работы — установление закономерностей изменения структуры алюминиевых сплавов при гидродинамическом воздействии бегущего электромагнитного поля на расплав при различной скорости охлаждения. В качестве измеряемых параметров были приняты размер зерна по ГОСТ 21073—75 и фактор формы зерен α-фазы.

В первой серии экспериментов заготовки получали на установке экспериментального литья с кристаллизацией под воздействием электромагнитного поля на расплав. Установка создана

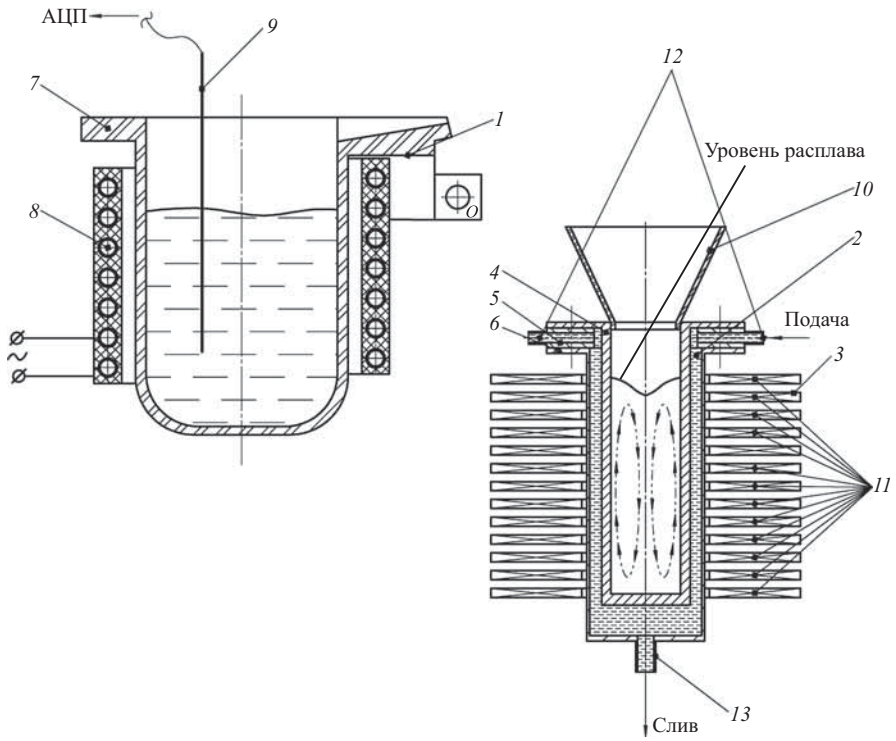


Рис. 1. Схема установки экспериментального литья с перемешивателем и кристаллизатором с водяным охлаждением

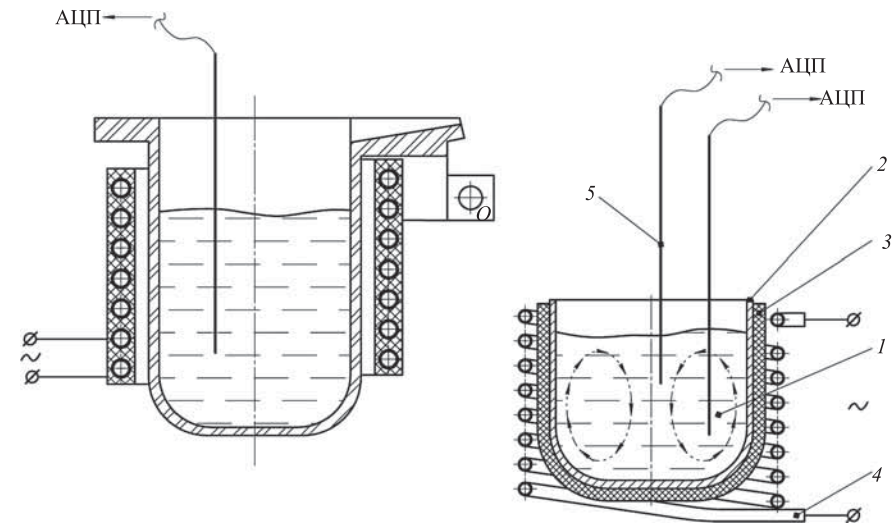


Рис. 2. Схема установки с кристаллизатором для электромагнитного воздействия на расплав

в учебно-научной лаборатории полупроводниковой техники и электротехнологий Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург). Схема установки приведена на рис. 1.

Экспериментальная установка состоит из индукционной печи *1*, кристаллизатора *2*, электромагнитного перемешивателя *3*. Конструктивно кристаллизатор выполнен в виде цилиндрической водоохлаждаемой изложницы *4*, смонтированной через обечайку *5* в корпус *6*.

Установка работает следующим образом: в тигель *7* индукционной печи *1* загружается силумин в брусках, на греющий индуктор *8* подается ток и происходит расплавление металла. Контроль температуры расплава в тигле осуществляют с помощью погружной термопары *9*, подключенной к аналогово-цифровому преобразователю (АЦП). После достижения расплавом нужной температуры происходит поворот печи *1* относительно оси *O* и заливка через приемочное устройство *10* в изложницу *4* перемешивателя *2*. Охлаждение изложницы осуществляется проточной водой, которая подается через присоединительные штуцеры *12*. Отработанная охлаждающая жидкость удаляется через сливной штуцер *13*. Во время заливки и кристаллизации расплава на катушки *11* подается ток заданной частоты, создающий бегущее вдоль оси перемешивателя электромагнитное поле, вызывающее движение расплава внутри изложницы.

Во второй серии экспериментов применяли кристаллизатор с индуктором для воздействия на жидкую фазу кристаллизующегося слитка (рис. 2). Главным отличием от кристаллизатора с водяным охлаждением является теплоизоляция тигля для обеспечения низкой скорости охлаждения расплава *1*. Теплоизолированный тигель *2* был помещен в индуктор *4*. Зазор между трубками индуктора и тиглем был заполнен теплоизоляционным материалом *3* (шамотной ватой). Теплоизоляция препятствовала охлаждению тигля за счет циркулирующей в индукторе *4* воды. Под действием бегущего магнитного поля возникало гидродинамическое движение расплава вдоль оси заготовки. Изменения температуры расплава контролировали двумя погружными термопарами *5*.

Исследовали распространенные литейные алюминиевые сплавы АК7, АК9 и АК5М.

В первой серии экспериментов варьировали температуру заливки расплава в перемешиватель, время воздействия электромагнитного поля на кристаллизующийся расплав, изменяли схему включения катушек перемешивателя, направление магнитного поля, частоту тока. В перемешивателе с принудительным водяным охлаждением получали отливки диаметром 40 мм и высотой 150 мм.

Во второй серии экспериментов использовали сплав АК9, изменяя температуру заливки, силу тока, направление магнитного поля и время перемешивания расплава. Заготовки, полученные в кристаллизаторе с индуктором, имели диаметр 85 мм и высоту 60 мм.

В полученных заготовках определяли фактор формы и размер зерна α-фазы. Образцы для микрошлифов вырезали из центральной и периферийной частей заготовок. Микрошлифы готовили с помощью оборудования фирмы Struers по стандартной методике. Травление проводили в 10%-ном растворе плавиковой кислоты.

Микроструктуру исследовали на световом микроскопе Carl Zeiss Axio Observer.D1m. Обработку изображений проводили с помощью программы Thixomet Pro. Оценивали размер зерна и пор[1]. В данной работе под размером зерна подразумевается размер дендритной ячейки.

Программа Thixomet Pro проводит обработку микрофотографии, выделяет элементы структуры с четко различимыми границами и окрашивает их в разные цвета. Далее по ГОСТ 21073—75 средний размер зерна рассчитывается по найденному числу зерен и площади, которую они занимают. С помощью специальных инструментов можно реконструировать плохо протравленные границы, исключить из анализа мелкие выделения второй фазы, распознанные как зерна или занимающие слишком малую площадь. В данном случае из анализа была исключена эвтектика. Количество зерен (дендритных ячеек), по которому проводили анализ, в каждом образце составляло около 2000.

В программе Thixomet Pro фактор формы зерна рассчитывается по формуле

$$F = \frac{4\pi S}{P^2},$$

где S — площадь зерна; P — периметр.

Для оценки формы зерна обычно используют обратную величину

$$R = \frac{P^2}{4\pi S}$$

и следующие критерии глобулярности микроструктуры: $1 < R < 1{,}7$ — глобулярная микроструктура; $1{,}7 < R < 2{,}4$ — розеточная микроструктура; $R > 2{,}4$ — дендритная микроструктура. Соответственно для фактора формы, рассчитываемого программой, получаем следующие соотношения: $F < 0{,}41$ — дендритная микроструктура; $0{,}41 < F < 0{,}58$ — розеточная микроструктура; $0{,}58 < F < 1$ — глобулярная микроструктура.

В первой серии экспериментов получены следующие результаты. Средний размер зерна (дендритной ячейки) в слитке из сплава АК5М в исходном состоянии (чушка) составил 108 мкм, фактор формы 0,31. В экспериментальных отливках размер зерна варьировался от 32 до 44 мкм. Наилучшие характеристики структуры тиксозаготовки получены при температуре разливки 670 °С с перемешиванием вниз в течение 20 с при частоте 50 Гц и двухполюсной схеме включения катушек (размер зерна 33 мкм, фактор формы 0,39).

Размер зерна в чушке из сплава АК7 составил 43 мкм, фактор формы 0,22. В экспериментальных отливках размер зерна изменялся от 22 до 30 мкм. Наилучшие параметры структуры тиксозаготовки были получены при температуре разливки 646 °С с перемешиванием вниз в течение 60 с при частоте 80 Гц и однополюсной схеме включения катушек (размер зерна 25 мкм, фактор формы 0,29).

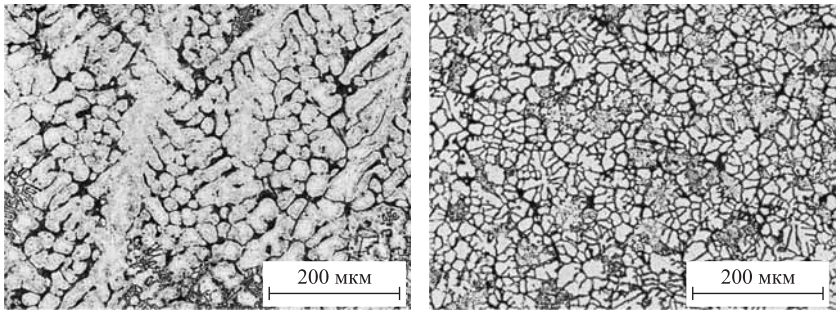
В исходном слитке из сплава АК9 размер зерна составил 81 мкм, а в экспериментальных отливках — от 32 до 44 мкм. Наилучшие характеристики структуры тиксозаготовки получены при температуре разливки 641 °С без перемешивания. Размер зерна в этом случае был равен 32 мкм, фактор формы 0,34 (в исходном состоянии 0,27). Пример микроструктуры исходной чушки и тиксозаготовки из сплава АК9 представлен на рис. 3.

Исследовали пористость в исходном состоянии и в экспериментальных тиксозаготовках. Размер пор в чушке из сплава АК9 составил 150 мкм, а их объемная доля 1,28 %. В экспериментальных отливках размер пор не превышал 15 мкм, а объемная доля 0,07 % (рис. 4). В сплаве АК7 исходный размер пор составил 27 мкм, объемная доля 0,61 %, а в экспериментальных отливках — 13 мкм и 0,13 % соответственно.

В перемешивателе с водяным охлаждением удалось добиться значительного измельчения зерна и снижения пористости отливок. Однако не была достигнута требуемая степень глобулярности микроструктуры. Во второй серии экспериментов было реализовано медленное охлаждение заготовок в процессе кристаллизации.

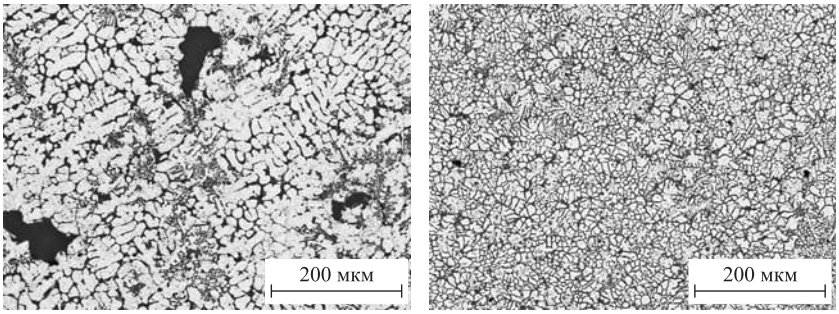
На рис. 5 приведена микроструктура в различных частях тиксозаготовки из сплава АК9, полученная при разливке с температуры 650 °С в условиях электромагнитного перемешивания при силе тока 600 А и времени охлаждения 10 мин.

[1] В работе принимали участие В.Н. Климов, Р.С. Лапин.



а) *б)*

Рис. 3. Микроструктура образцов из сплава АК9:
а — исходная; *б* — после электромагнитного перемешивания



а) *б)*

Рис. 4. Поры в чушке из сплава АК9 (*а*) и в экспериментальной отливке (*б*)

Анализ размеров зерна d и фактора формы F показал, что электромагнитное перемешивание приводит к получению достаточно однородной структуры по сечению заготовки, при этом глобулярность структуры значительно выше, чем при кристаллизации заготовки в перемешивателе с водяным охлаждением.

В условиях кристаллизации с использованием электромагнитного перемешивания расплава, помимо глобуляризации зерен α-фазы, было отмечено изменение морфологии промежуточных фаз типа Al—Fe—Si. Наряду с частицами, имеющими форму иероглифа, образуются частицы в виде игл. Также в структуре наблюдаются крупные кристаллы первичного кремния (рис. 6).

На сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Phenom Pro X, оснащенном энергодисперсионным рентгеновским дифракционным спектрометром, проведен точечный химический анализ образцов из сплава АК9.

Анализ частицы, имеющей формы иероглифа, показал, что в ос-

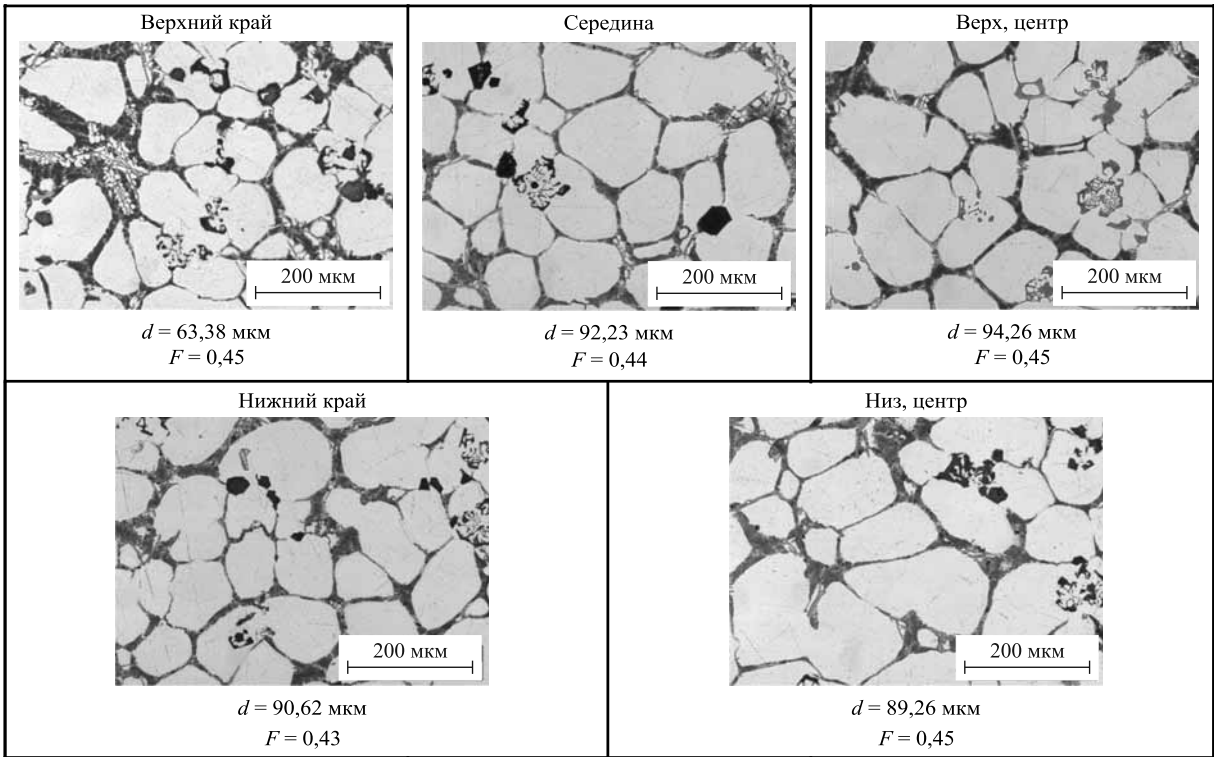


Рис. 5. Микроструктура тиксозаготовки из сплава АК9

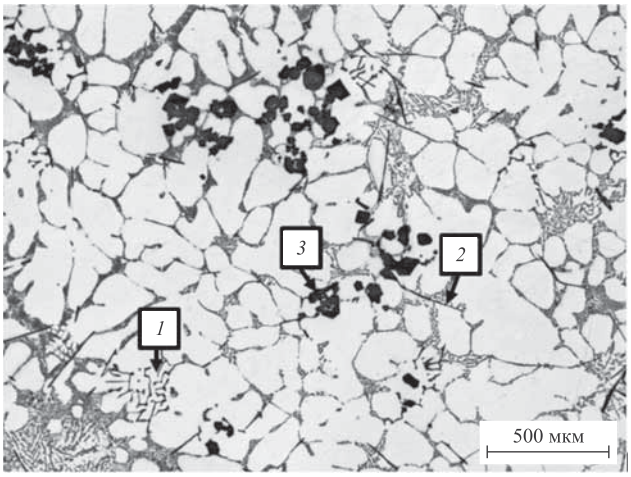
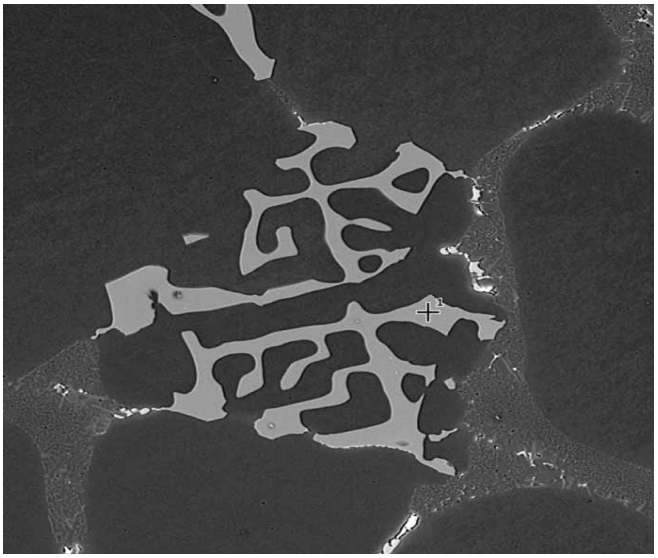


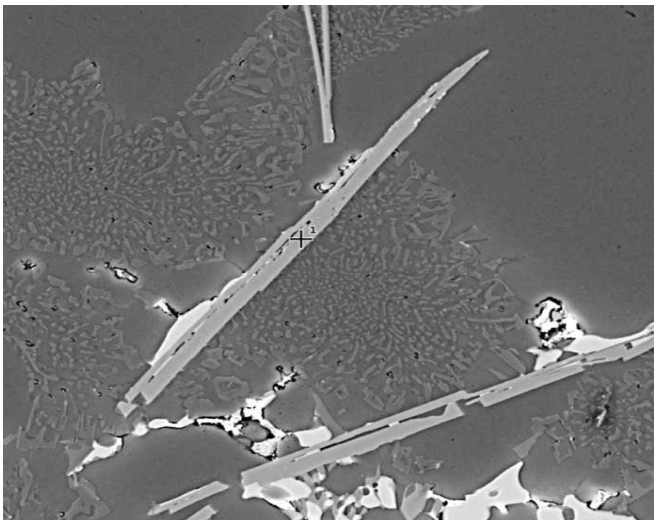
Рис. 6. Микроструктура тиксозаготовки из сплава АК9:
1 — частицы в форме иероглифа; *2* — частицы в виде игл; *3* — первичный кремний



Параметр	Элемент				
	Al	Fe	Si	Mn	O
Концентрация, % мас.	59,5	15,4	11,8	3,0	10,3
Ошибка, %	0,3	1,0	1,1	2,2	2,4

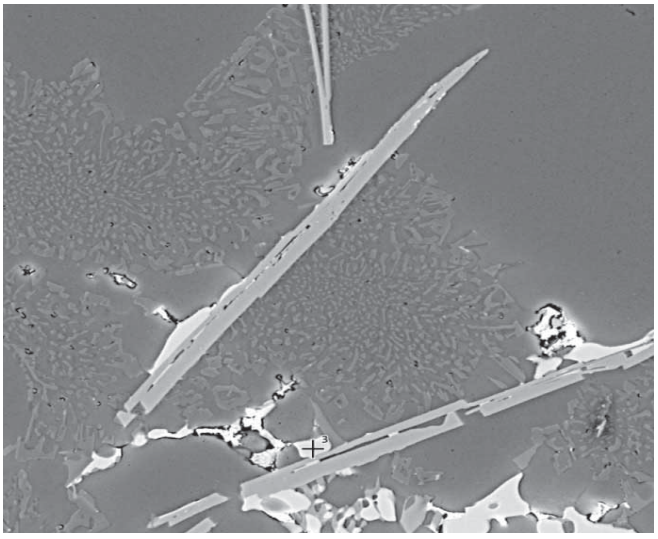
Рис. 7. Результат анализа частицы в форме иероглифа

новном частица содержит алюминий, железо и кремний (рис. 7). Частицы игольчатой формы также в основном содержат эти элементы (рис. 8). Кроме фаз типа Al—Fe—Si в образце обнаружены более мелкие частицы фаз, содержащих главным образом алюминий и медь (рис. 9). Крупные кристаллы первичного кремния из-за низкого химического контраста с помощью СЭМ Phenom исследовать не удалось.



Параметр	Элемент				
	Al	Si	Fe	C	Mn
Концентрация, % мас.	43,1	37,9	15,8	2,3	0,9
Ошибка, %	0,4	0,5	1,0	3,5	5,6

Рис. 8. Результат анализа игольчатой частицы



Параметр	Элемент				
	Al	Cu	C	Si	Fe
Концентрация, % мас.	62,1	32,7	2,7	2,1	0,4
Ошибка, %	0,4	1,0	3,2	4,8	14,5

Рис. 9. Результат анализа мелкой частицы

Выводы

1. Применение гидродинамического воздействия магнитных полей на кристаллизующийся расплав является перспективным методом получения заготовок с глобулярной структурой.

2. Использование электромагнитного перемешивания с водяным охлаждением при получении заготовок из литейных алюминиевых сплавов позволяет существенно уменьшить размер зерна α-фазы и предотвратить развитие дендритной структуры слитка.

3. Электромагнитное перемешивание значительно уменьшает пористость отливок (в сплаве АК7 — в 5 раз, в сплаве АК9 — в 18 раз).

4. Электромагнитное перемешивание с медленным охлаждением при кристаллизации тиксозаготовки приводит к значительному увеличению глобулярности микроструктуры. Наблюдается изменение морфологии промежуточных фаз типа Al—Fe—Si в литейных сплавах.

5. Использование магнитного гидродинамического воздействия на расплав при кристаллизации существенно повышает однородность микроструктуры в поперечном сечении тиксозаготовок.

6. Получение заготовок с заданными параметрами структуры возможно с использованием кристаллизатора полунепрерывной разливки, реализующего двухстадийную кристаллизацию с различной скоростью охлаждения и интенсивностью магнитного перемешивания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Семенов Б.И., Куштаров К.М.** Производство изделий из металла в твердожидком состоянии. Новые промышленные технологии: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 223 с.

2. **О влиянии** условий кристаллизации на структуру тиксозаготовок из литейных Al сплавов / А.Ю. Аксененко, С.А. Бычков, В.Н. Климов и др. // Металлургия машиностроения. 2013. № 2. С. 17—20.

3. **Об электромагнитном** воздействии на расплав алюминия при его модифицировании / Н.В. Коробова, А.Ю. Аксененко, Ф.Е. Тарасов и др. // Металлургия машиностроения. 2013. № 1. С. 8—11.

4. **Практическое** использование изменения механических характеристик конструкционных углеродистых сталей при холодной объемной штамповке / А.М. Дмитриев, Ф.В. Гречников, Н.В. Коробова, Н.С. Толмачев // Вестник МГТУ "Станкин". 2014. № 4 (31). С. 41—44.

5. **Дмитриев А.М., Коробова Н.В., Толмачев Н.С.** Экспериментальная проверка результатов компьютерного моделирования напряжений на элементе деформирующего инструмента // Вестник МГТУ "Станкин". 2014. № 2 (29). С. 44—49.

6. **Дмитриев А.М., Коробова Н.В., Петров М.Д.** Разработка технологии производства корпуса гидроцилиндра из железного порошка // Вестник МГТУ "Станкин". 2014. № 1 (28). С. 54—58.

7. **Григорьев С.Н.** Перспективы развития единого федерального инжинирингового центра в области станкостроения на базе МГТУ "Станкин" и ОАО "СТАНКОПРОМ" // Вестник МГТУ "Станкин". 2014. № 1 (28). С. 8—12.

8. **Волосова М.А., Надыкто А.Б., Ошурко В.Б.** Атомно-молекулярное конструирование: разработка на базе центра коллективного пользования МГТУ "СТАНКИН" перспективных технологий создания материалов с уникальными свойствами для нужд отечественной промышленности // Вестник МГТУ "Станкин". 2014. № 4 (31). С. 16—26.

9. **Григорьев С.Н.** Тенденции и проблемы модернизации машиностроительного производства на базе отечественного станкостроения // Вестник МГТУ "Станкин". 2010. № 3. С. 7—13.

10. **Сосенушкин Е.Н.** Штамповка кристаллизующегося металла // Вестник МГТУ "Станкин". 2010. № 2. С. 12—20.

Наталья Васильевна Коробова, д-р техн. наук;
Анатолий Юрьевич Аксененко;
Владислав Игоревич Лузгин, канд. техн. наук;
Василий Эдуардович Фризен;
Светлана Юрьевна Шевченко, канд. техн. наук,
zakalka1@yandex.ru

ООО "Издательство **Инновационное машиностроение"**, 107076, Москва, Колодезный пер., д. 2а
Учредитель ООО "Издательство Машиностроение". **E-mail: zpm@mashin.ru**
Тел. редакции журнала: (499) 268-47-19, 269-54-96. http://www.mashin.ru
Дизайнер *Подживотов К.Ю.* Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 12.05.2015. Подписано в печать 01.07.2015. Формат 60 × 88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: **www.aov.ru**
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.