ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(Кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства)

№ 9 сентябрь 2012

Председатель редакционного совета и Главный редактор
СЕМЁНОВ Е.И.

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

Зам. Главного редактора
СЕРИКОВА Е.А.

Редакционный совет:
БЕЛЯКОВ А.И.
БЛАНТЕР М.С.
БОГАТОВ А.А.
БОКОВ А.А.
ГАРИБОВ Г.С.
ГРОМОВ В.Е.
ГУН И.Г.
ЕВСЮКОВ С.А.
ЕРШОВ М.Ю.
КАПУСТИН А.И.
КАСАТКИН Н.И.
КИДАЛОВ Н.А.
КОРОТЧЕНКО А.Ю.
КОШЕЛЕВ О.С.
КРУК А.Т.
МОРОЗ Б.С.
МУРАТОВ В.С.
НАЗАРЯН Э.А.
ОВЧИННИКОВ В.В.
ПАСЕЧНИК Н.В.
ПОВАРОВА К.Б.
ПОЛЕТАЕВ В.А.
СЕМЁНОВ Б.И.
СУБИЧ В.Н.
ТРЕГУБОВ В.И.
ШАТУЛЬСКИЙ А.А.
ШЕРКУНОВ В.Г.
ШЕСТАКОВ Н.А.
ШПУНЬКИН Н.Ф.
ЯКОВЛЕВ С.С.
ЯМПОЛЬСКИЙ В.М.

Ответственный за подготовку и выпуск номера
ЛУТОВИНИНА О.Н.

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Литейное и сварочное производства

Леушина Л.И., Нищёнков А.В., Палавин Р.Н. Классификация способов повышения трещиностойкости оболочковых литейных форм по выплавляемым моделям 3
Маслов К.А., Кошелев О.С., Самохвалов С.Г., Смирнов А.С. Технологичная жидкостекольная смесь для изготовления стержней в производстве стального литья 8
Моисеев Д.О., Леушин И.О. Разработка эффективной технической схемы снижения газовой пористости в литье под давлением алюминиевых сплавов 10
Сивков В.Л., Ульянов В.А., Гущин В.Н. Рафинирование расплава в промежуточном ковше для литых заготовок под прокат 12
Сивков В.Л., Чеберяк О.И., Кулагин М.Ю., Ромашевский А.В. Опыт применения покровно-проникающих противопригарных покрытий в ООО "Метмаш" 15
Собачкин А.В., Яковлев В.И., Ситников А.А. Применение методов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и механоактивационной обработки для создания новых наплавочных материалов 17

Кузнечно-штамповочное производство

Галкин В.В., Кудрявцев С.А., Терещенко Е.Г., Дербенев А.А. Методика расчета конечных пластических деформаций металлоизделий, изготовленных многопереходными процессами холодной объемной штамповки 23
Александров С.Е., Пирумов А.Р. Расчет процессов обработки металлов давлением вязкопластических материалов методом верхней оценки 28
Галкин В.В., Поздышев А.И., Поздышев В.А., Вашурин А.В. Изготовление толстолистовой оболочки защитного шлема из высокопрочных алюминиевого и титанового сплавов методом глубокой горячей вытяжки 33

Прокатно-волочильное производство

Панин В.Г. Изучение выкатываемости фланцевых колец и факторов интенсификации их формообразования 37

Материаловедение и новые материалы

Савин И.А. Исследование характеристик износостойких покрытий, наносимых на режущие инструменты сложной формы методом катодно-ионной бомбардировки 41

Информация

Кошелев О.С. К вопросу о группировании деталей с точки зрения общности заготовки для их получения 45

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

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

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

© "Издательство "Машиностроение", "Заготовительные производства в машиностроении", 2012

SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

BLANKING PRODUCTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

(Forging and stamping, foundry and others productions)

№ 9 September 2012

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.
BOKOV A.A.
GARIBOV G.S.
GROMOV V.E.
GUN I.G.
EVSYUKOV S.A.
ERSHOV M.Yu.
KAPUSTIN A.I.
KASATKIN N.I.
KIDALOV N.A.
KOROTCHENKO A.Yu.
KOSHELEV O.S.
CRUCK A.T.
MOROZ B.S.
MURATOV V.S.
NAZARYAN E.A.
OVCHINNIKOV V.V.
PASECHNIK N.V.
POVAROVA K.B.
POLETAEV V.A.
SEMENOV B.I.
SUBICH V.N.
TREGUBOV V.I.
SHATULSKY A.A.
SHERKUNOV V.G.
SHESTAKOV N.A.
SHPUN'KIN N.F.
YAKOVLEV S.S.
YAMPOLSKY V.M.

This issue prepared with assistance of specialist
LUTOVININA O.N.

An advertiser is responsible for the promotional materials

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

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

CONTENTS

Casting and Welding Productions

Leushina L.I., Nishchenkov A.V., Palavin R.N. Classification of solutions to increase of cracking resistance in multi-layer shell investment moulds 3
Maslov K.A., Koshelev O.S., Samokhvalov S.G., Smirnov A.S. Workable water glass mixture for fabrication of cores in production of steel casting 8
Moiseev D.O., Leushin I.O. Development of effective technical scheme to reduce of gas porosity in die casting of aluminum alloys 10
Sivkov V.L., Ul'yanov V.A., Gushchin V.N. Refining of melt in intermediate ladle for castings for rolled products 12
Sivkov V.L., Cheberyak O.I., Kulagin M.Yu., Romashevsky A.V. Experience of application of cover-penetration antipenetration coatings in LLC "Metmash" 15
Sobachkin A.V., Yakovlev V.I., Sitnikov A.A. Application of self-propagating high-temperature synthesis and mechanical activation treatment methods for creating of new welding materials 17

Forging and Stamping Productions

Galkin V.V., Kudryavtsev S.A., Tereshchenko E.G., Derbenev A.A. Design procedure of final plastic deformations of metal specialties produced by multitransition processes of cold forging 23
Aleksandrov S.E., Pirumov A.R. Calculation of plastic metal working processes of viscoplastic materials by upper bound method 28
Galkin V.V., Pozdyshev A.I., Pozdyshev V.A., Vashurin A.V. Manufacture of plate shell of crash helmet made of high-strength aluminum and titanium alloys by deep hot drawing 33

Rolling and Drawing Productions

Panin V.G. Study of flange rings rolling out and intensification factors of their forming 37

Physical Metallurgy and New Materials

Savin I.A. Investigation of characteristics of wear-resistant coatings deposited on cutting tools of complex shape by cathode-ion bombardment 41

Information

Koshelev O.S. To issue of details grouping in terms of blank community for their production 45

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

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

© "Mashinostroenie Publishers", "Blanking productions in mechanical engineering", 2012

УДК 621.074

Л.И. Леушина, А.В. Нищёнков, Р.Н. Палавин *(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева)*

Классификация способов повышения трещиностойкости оболочковых литейных форм по выплавляемым моделям

Приведена классификация способов решения проблемы трещиностойкости оболочковых литейных форм по выплавляемым моделям, составленная по результатам аналитического обзора и исследований авторов.

Ключевые слова: литье по выплавляемым моделям; отливка; многослойные оболочковые формы; трещиностойкость.

The results of analytical survey and the authors' scientific researches as well as classification of solutions to increase of cracking resistance in multi-layer shell moulds for investment casting are presented.

Keywords: investment casting; casting; multi-layer shell moulds; cracking resistance.

Одним из прогрессивных специальных способов литья, применяемого для получения литых заготовок деталей самой высокой сложности, является литье по выплавляемым моделям (ЛВМ). Главное преимущество ЛВМ – высокая точность геометрии получаемых отливок, позволяющая минимизировать затраты на последующую механическую обработку отливок до получения готовой детали.

Получение отливок, соответствующих предъявляемым к ним требованиям, непосредственно связано с качеством оболочковой формы (ОФ).

Качество оболочковой формы формируется на всех технологических этапах их изготовления: производства моделей, приготовления и нанесения огнеупорной суспензии на модель, обсыпки огнеупорным материалом, послойной сушки слоев ОФ, выплавления моделей из форм, их прокаливания и заливки расплавом.

В ходе изготовления оболочковой керамической формы ряд факторов может явиться причиной получения бракованных отливок. Приоритетным среди них является низкая трещиностойкость керамической ОФ, приводящая к таким дефектам, как гребешки, засоры, вплоть до полного разрушения формы.

Под термином "трещиностойкость" понимаем способность ОФ выдерживать механическое и температурное воздействие на нее без появления явных признаков разрушения, т.е. трещин.

Проблема повышения трещиностойкости ОФ – предмет изучения многих исследователей, предлагающих различные варианты улучшения качества ОФ в части их трещиностойкости. Однако отсутствует систематизация вариантов решения проблемы повышения трещиностойкости, что вызывает трудности применения разработок в действующем производстве.

Авторами статьи был проведен анализ более 30 публикаций (были использованы материалы журнала "Литейное производство"), посвященных предлагаемым вариантам решения проблемы трещиностойкости ОФ и предложена классификация способов решения данной проблемы, представленная на рисунке.

В классификации можно выделить два направления решения проблемы: конструкторское и технологическое.

Варианты 1.1, 1.2 конструкторского направления, такие как увеличение количества слоев, увеличение толщины стенки или слоя, позволяют повысить жесткость оболочковых форм и тем самым стойкость против термомеханических воздействий на всех этапах их изготовления.

Вариант 1.3 описан в работе А.И. Евстигнеева, В.В. Петрова, В.И. Куренкова, В.В. Васина, Ри Хосена. Авторами этой работы на примере корпуса водомерной колонки установлено, что на брак по трещинам существенно влияют условия выплавления моделей. При выплавлении в тонком среднем сечении формы модельная масса расплавляется раньше, чем в районе

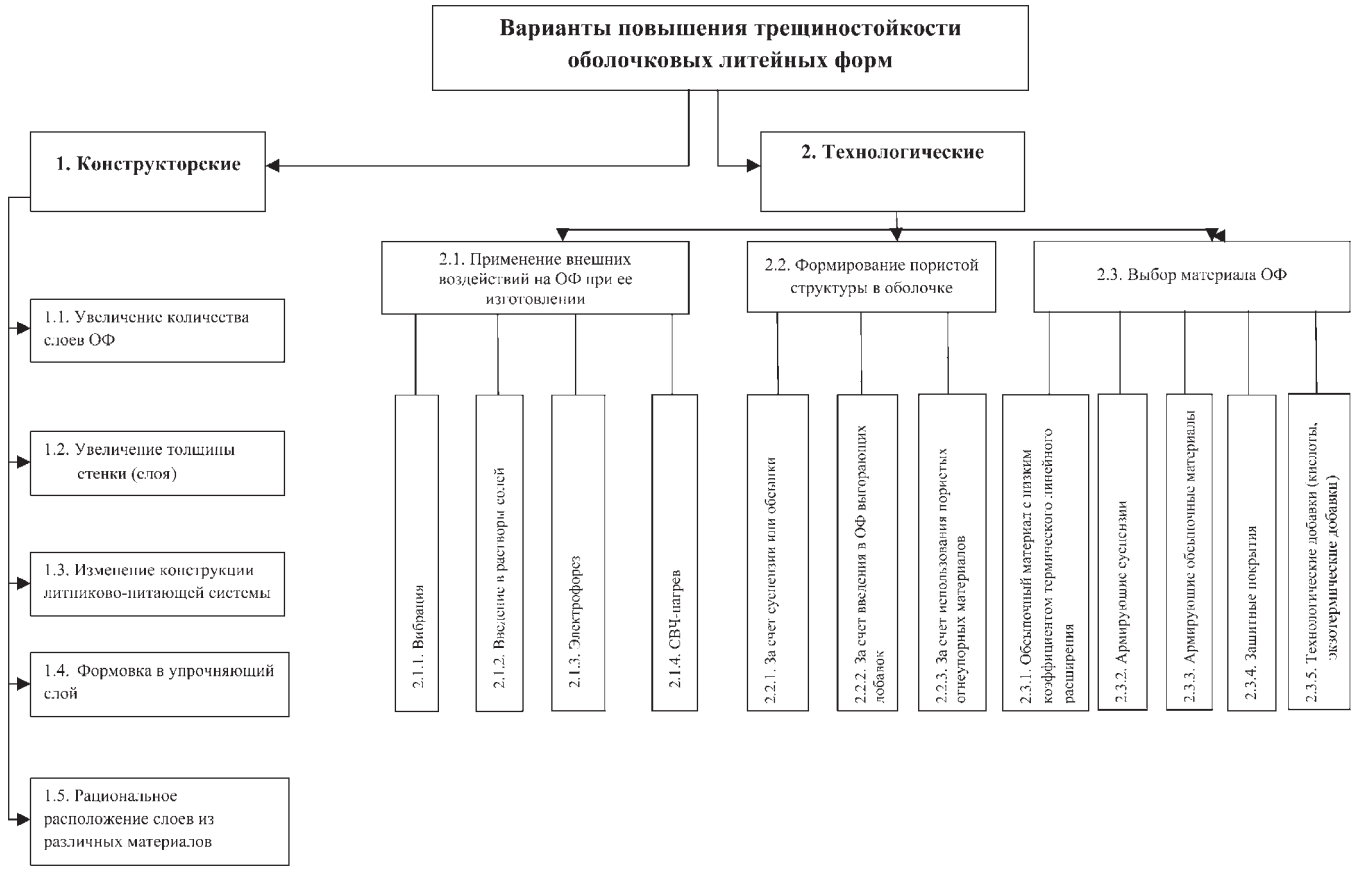
присоединения питателей, прибылях и стояке. Возникает давление, способствующее появлению трещин, которые развиваются при прокаливании. Для устранения разницы линейного расширения моделей стояка и детали предложена конструкция формы без стояка. Данный вариант решения проблемы предложен авторами для крупных отливок сложной геометрии, что накладывает определенные ограничения на область (возможность) его применения.

Другим примером реализации варианта 1.3 является технология свободной заливки расплава модельного состава для формирования литниковой системы (Г.В. Утешёв, И.П. Филиппова, А.Н. Любимов). Стояки при этом являются пустотелыми. В собранную форму перед заливкой проставляются металлические стержни. Через 1,5...2 мин стержень извлекается, в застывающую модельную массу вставляется модель литниковой чаши с укороченной ручкой и в форму доливается остаток модельного состава для формирования геометрии чаши. Растрескивание форм-оболочек в процессе сушки блоков с применением пустотелых стояков устраняется, снижается масса модельных блоков.

Формовка оболочек в упрочняющий слой (вариант 1.4), являющийся "жакетом", из жидкоподвижной самотвердеющей смеси на жидком стекле с добавкой карбонатного песка также позволяет повысить прочность и жесткость ОФ (А.П. Макаревич, А.И. Савчишин, В.А. Клименко).

В работе А.И. Евстигнеева, И.Г. Сапченко, В.Н. Тышкевича, Г.И. Тимофеева (вариант 1.5) исследовано влияние пористости слоев и их расположение по толщине оболочки на прочность формы. Установлено, что предел прочности образцов-пластин с крайними слоями без порообразующих добавок уменьшается незначительно с возрастанием пористости слоев. Поэтому при рациональном проектировании ОФ по выплавляемым моделям с повышенной термопрочностью пористые слои целесообразно располагать симметрично по толщине стенки ближе к середине.

При использовании разнослойных (этилсиликат и жидкое стекло) ОФ также наблюдается положительный эффект, поскольку расположенный внутри и вблизи оси стенки жидкостекольный слой при вытопке и нагреве создает незначительный изгибающий момент в ОФ, который за счет податливости жидкого стекла гасится соседними слоями на гидролизованном растворе этилсиликата (Г.П. Ким, Н.В. Маркина, Н.Б. Зубкова). Последнее, образуя наружный контур стенки оболочки, определяет основную величину момента сопротивления формы особенно при высоких температурах. Кроме того, если температура залитого



Способы решения проблемы трещиностойкости оболочковых литейных форм

расплава выше температуры формы, то жидкостекольный слой размягчаясь релаксирует плюсовые напряжения лицевого этилсиликатного слоя, ослабляя силовое воздействие на последующие слои.

В технологическом направлении повышения прочности ОФ выделяют три группы.

Первая группа – применение внешних воздействий на ОФ при ее изготовлении.

Наложение вибрационного воздействия на стадии изготовления ОФ (вариант 2.1.1) обеспечивает равномерное нанесение обсыпочного материала на слои формы, что приводит к более плотному расположению фракции зернистого огнеупорного наполнителя в каждом формируемом слое.

По данным некоторых исследователей (Ю.Г. Хмелев), выдержка керамических оболочек в водных растворах солей металлов (магния, алюминия, кальция) (вариант 2.1.2) также положительным образом отражается на уменьшении вероятности образования трещин в ОФ.

Н.С. Евстигнеева, В.А. Акопян, В.И. Крестьянов, В.В. Пиминов предлагают оптимизировать процесс изготовления ОФ методом электрофореза (вариант 2.1.3). Электрофорез представляет собой электрокинетическое явление перемещения частиц дисперсной фазы коллоидных растворов в жидкой или газообразной среде под действием внешнего электрического поля. С помощью электрофореза удается покрывать мелкими частицами поверхность, обеспечивая глубокое проникновение в углубления и поры. При этом эффект усиливается одновременным введением в форетическую суспензию химически упрочняющихся добавок (мочевино-формальдегидной смолы, модифицированной фурфуриловым спиртом для повышения стойкости). При последующем прокаливании происходит спекание частиц огнеупорного наполнителя, повышающее прочность керамики и снижающее ее деформационную способность. Однако предлагаемый авторами способ небезопасен с экологической точки зрения.

Применение сверхвысокочастотного нагрева (вариант 2.1.4) для прокаливания оболочковых керамических форм на основе электрокорунда предполагает необходимость оснащения производства дополнительным оборудованием для его осуществления (И.А. Шапранов, Г.М. Слепнев, С.П. Кокойкин, С.И. Брыков, В.Н. Зинченко, Е.Н. Каблов, И.М. Демонис, В.В. Деев, Ю.А. Бондаренко, А.Р. Нарский). ОФ после обработки в поле СВЧ имеют большую степень однородности структуры, равномерное распределение по объему зерен корунда и плотную упаковку зернистой массы. Эти особенности состава и структуры обеспечивают их высокие прочностные характеристики. Метод обладает высокой производительностью, способствует значительному уменьшению энергозатрат, обеспечивает высокое качество поверхности форм и их высокие физико-механические характеристики. Кроме того, при воздействии СВЧ-излучения на ОФ происходит практически безынерционный нагрев (независимый от материала ОФ), что позволяет легко управлять процессом.

Вторая группа – формирование пористой структуры в оболочке.

Создание пористой структуры керамической формы, релаксирующей термические напряжения, благоприятно сказывается на повышении ее трещиноустойчивости. Формы с пористыми слоями имеют повышенную трещиноустойчивость, а необходимая толщина форм достигается меньшим количеством слоев. Так, в работе Ю.П. Васина и А.Н. Логиновского рассмотрено изготовление керамических форм на основе жидкостекольной суспензии с пористой структурой, которую получают продувкой жидкостекольной суспензии воздухом (вариант 2.2.1). Воздух при этом частично растворяется в жидкой фазе, а некоторые образовавшиеся его пузырьки находятся длительное время в суспензии, становясь источником пористой керамики.

И.Г. Сапченко предлагает создавать пористую структуру путем применения различных режимов барботажной обработки этилсиликатных суспензий с эфироальдегидной фракцией, ацетоном и водой, использования в качестве обсыпочных материалов перлита и пенополистирола. Так как после обсыпания суспензии кварцевым песком покрытия из аэрированной суспензии имеют большую открытую пористость в виде мелких, но глубоких раковин из-за выхода замешанного при барботировании воздуха, то нанесение второго и последующих слоев осуществляли погружением предварительно смоченного суспензией блока моделей в порообразующие материалы. Однако формы, изготовленные из аэрированных суспензий, прокаленные и заливаемые без опорного наполнителя, разрушаются под действием гидростатического давления расплавленного металла. Таким образом, желаемый результат может быть достигнут лишь при условии прокаливания ОФ в опорном наполнителе.

Г.М. Юй и С.Г. Моисеев для обсыпки одного из слоев применяют пористые огнеупорные материалы, препятствующие распространению образующихся трещин: аглопорит гравиеподобной формы, глинозольный керамзит, зольный гравий, отходы пеношамота (вариант 2.2.2). Одним из преимуществ пористых огнеупоров является их развитая поверхность и низкая кажущаяся плотность (0,4...1,7 г/см^3), позволяющие единице массы связующего удерживать крупное зерно и наращивать в один прием слой определенной толщины.

Эффективным вариантом решения проблемы может служить использование цеолитов, отличающихся строго регулярной структурой пор, в качестве огнеупорного материала [1].

Для формирования пористой структуры возможно применение отходов сельскохозяйственного производства (лузги подсолнечника, шелухи гречихи, мелко резаной соломы), карбамида, вспененных полистирольных гранул (В.С. Конотопов, В.Ф. Антипенко, С.И. Кулагина). Однако эти материалы имеют ряд не-

достатков. Отходы сельхозпроизводства имеют нестабильные свойства по геометрии и влажности, а их остропластинчатая форма является концентратором напряжений в форме. Карбамид вследствие его высокой гигроскопичности резко ухудшает условия сушки, а высушенные формы при хранении сильно увлажняются с разупрочнением керамики. При выгорании карбамида в атмосферу выделяются токсичные оксиды азота, предварительное растворение карбамида удлиняет цикл изготовления форм и отливок и создает трудно разрешимую проблему его утилизации.

Вспененные полистирольные гранулы также малопригодны из-за необходимости создания участка для вспенивания и рассева гранул, что приводит к увеличению производственных мощностей и, соответственно, себестоимости отливок. Во избежание указанных выше недостатков предложено использовать в качестве обсыпочного материала гранулированный модельный состав с размерами гранул 0,7...2,0 мм. При меньших размерах наблюдается расслоение слоев (по пористому слою), при больших – пористые слои имеют низкую прочность. Термостойкость ОФ увеличивается, прокаливать этилсиликатные формы на кварцевых материалах можно без опорного наполнителя.

Третья группа – выбор материала оболочковой формы.

Повышение термостойкости, трещиноустойчивости и газопроницаемости форм достигается за счет использования в качестве огнеупорного армирующего материала с низким коэффициентом термического линейного расширения (вариант 2.3.1) – отходов фарфорового производства после предварительной высокотемпературной обработки (обжига) (А.И. Евстигнеев, В.В. Петров, В.И. Куренков, И.Г. Сапченко, В.В. Васин, Ри Хосен, Е.А. Чернышов), шамотной крошки (А.И. Карасев, С.И. Плис, М.Н. Телеван), плавленого кварца и электрокорунда (А.А. Руденко, В.А. Рыбкин) соответственно подобранного гранулометрического состава. Конкретным примером реализации данного варианта может служить применение плавленого кварца (торговая марка "Экосил-мелур"), которое способствует улучшению качества оболочки из-за низкого коэффициента термического расширения, высокой химической стойкости и малой насыпной плотности указанного материала (А.К. Лесников, Ю.И. Фоломейкин, Л.В. Угадчикова).

По варианту 2.3.2 предложено армировать форму чешуйчатой слюдой одновременно с нанесением суспензии, предварительно замешивая в нее слюду (Г.И. Тимофеев, А.И. Евстигнеев, Ю.А. Зиновьев, Л.Ф. Лобанова, В.И. Лашин). После присыпки обсыпочным материалом чешуйки слюды как бы пронизывают слои, повышая трещиноустойчивость форм.

Прочность оболочки может быть повышена за счет введения модифицированного связующего на основе щелочного кремнезоля (И.Н. Гагин, Ю.Ф. Карпович). Усиление эффекта достигается применением в качестве огнеупорного наполнителя алюмосиликата. Он не претерпевает полиморфных превращений в интервале рабочих температур керамической формы. Из-за низкого коэффициента термического расширения формы, полученные на пылевидном алюмосиликате, обладают достаточной прочностью при высоких температурах.

В статье В.М. Александрова, Б.А. Кулакова, В.А. Лонзингера рассмотрено изготовление первых двух слоев керамической формы с этилсиликатом, а последующих – с жидкостекольным связующим. После сушки четвертого из шести слоев оболочки помещают в водный раствор алюмохромфосфатной связки. Для нанесения двух последних слоев в жидкостекольную суспензию добавляют 2,5...3,0 % предварительно распушенного хризотилового асбеста. После нанесения пятого и шестого слоев их послойно упрочняют в растворе, содержащем равные количества (по массе) алюмохлорида, спирта и ортофосфорной кислоты. Однако асбест неприемлем с позиции отсутствия его экологической безопасности, поскольку он является сильным канцерогеном, вызывающим онкологические заболевания.

В работе В.Д. Ноздрина, В.С. Омельченко, Т.К. Кварцевой, Н.М. Цаплевой предложен принципиально другой механизм формирования прочности ОФ при ее изготовлении: замена ЭТС алюмохромфосфатной связкой (путем внесения АХФС 5 % по массе в гидролизованный раствор ЭТС). В процессе удаления гигроскопической воды при сушке огнеупорных изделий происходят полимеризация и поликонденсация пленки фосфатного связующего с образованием новых химических соединений с огнеупорными материалами изделий. При нагреве до температуры обжига удаляется химически связанная вода, что несколько разрыхляет и разупрочняет структуру пленки связующего. Но это разупрочнение компенсируется спеканием огнеупорных материалов при высоких температурах.

В качестве связующего, улучшающего прочностные свойства оболочки, может выступать "Сиалит-20", представляющий собой стабильный водный коллоидный раствор частиц кремнезема размером 8...10 нм и являющийся готовым связующим (Ю.Н. Савельев, А.С. Грибанов, В.С. Кучеренко).

Использование огнеупорных суспензий с низкомодульным жидким стеклом, наполнителем которых является минерал – пирофиллит, способствует предупреждению расплавления силикатной эвтектики жидкого стекла, что ведет к сдвигу максимума рабочих температур выше 900 °С (А.П. Макаревич, А.С. Кочешков, Р.В. Лютый). Пластические деформации в такой керамике отсутствуют, что обеспечивает ее высокую трещиностойкость.

Термостойкое готовое связующее "Армосил" представляет собой водную дисперсию мелких сферических частиц SiO_2, способных смешиваться со всеми огнеупорными материалами. "Армосил" обладает достаточной прочностью, точностью размеров и просто-

той применения. В процессе коагуляции связующего образуются гели с очень низкими остаточными напряжениями. Формы на основе "Армосил" обладают большей газопроницаемостью и имеют меньшую склонность к растрескиванию. При высыхании "Армосил" твердеет необратимо (В.О. Емельянов, А.А. Бречко, К.В. Мартынов).

В качестве армирующего обсыпочного материала (вариант 2.3.3), усиливающего тиксотропно-структурирующие связи, выступает волокнистый высокопористый диатомит (Ю.А. Селиванов). Наличие такого каркаса в структуре еще не затвердевшего покрытия создает благоприятные условия для релаксации внутренних напряжений, проявляющихся при сушке. Равномерно распределенные волокнистые частицы диатомита устраняют зарождение и распространение трещин в оболочке при прокаливании и заливке.

М.Н. Евстигнеева, В.А. Рыбкин, Р.Ф. Юсипов, Ю.В. Дедясов в качестве материала опорной части, обеспечивающего плотный контакт с керамической этилсиликатной облицовкой и сохраняющего высокую жесткость и стабильность размеров при температурах заливки, предлагают применять цементные смеси на основе шамота, кварцевого песка с керамзитом, керамзита.

Ю.П. Васин, Ю.М. Иткин, А.Н. Логиновский, А.Н. Копылов акцентируют внимание на замене последнего слоя формооболочки защитно-упрочняющим покрытием на основе синтетических смол (вариант 2.3.4). Последний слой синтетической смолы наносят путем окунания, а затем отверждают в жидком отвердителе (мочевино-формальдегидные и карбамидно-фурановые смолы). После отверждения смолы на поверхности формы образуется прочная водонерастворимая пленка, придающая форме дополнительную прочность и предотвращающая размокание и разупрочнение ее при выплавлении модельного состава. Увеличение прочности форм при 900 °С объясняется образованием при выгорании смолы коксового скелета, дополнительно скрепляющего зерна обсыпочного материала предыдущих слоев оболочки. При этом не ухудшается газопроницаемость и снижается газотворность формы. Однако предлагаемые для использования смолы являются опасными вредными веществами, которые при малых концентрациях в воздухе имеют однонаправленное действие на организм человека [2].

Ликвидации возможности появления трещин по варианту 2.3.5 способствуют добавки термита (алюминиевая пудра, порошок окалины) в упрочняющие слои формы, которые при прокаливании нагревают эти слои до расплавления (И.Е. Писарев). Смачивая кремнезем, образовавшийся расплав продуктов экзотермических реакций, залечивает трещины в оболочке. Экзотермические добавки повышают податливость оболочковой формы.

Авторами данной статьи предложено вводить добавки кислородсодержащего вещества (дихромата калия) в материал оболочковой формы, что позволит помимо меньшего температурного максимума и сокращенной длительности пребывания формы в прокалочной печи добиться полного удаления остатков модельной композиции, завершения основных превращений в связующем материала оболочковой формы, а также спекания огнеупорного материала на основе кварца для обеспечения прочности формы.

Присадка в суспензию пирогенного микрокремнезема (пылевидный отход, улавливаемый в системах газоочистки ферросплавного производства) значительно повышает огнеупорность и термостойкость ОФ, изготовляемых на основе гидролизованного раствора этилсиликата или жидкого стекла (С.А. Никифоров, К.И. Гилевич).

Исследователи Л.Г. Знаменский, О.В. Ивочкина, А.С. Варламов связывают проблему обеспечения трещиностойкости ОФ с вопросом ускоренного изготовления форм. Решение проблемы достигается путем плакирования зернистых материалов катализаторами гелеобразования ЭТС-связующего и использования плакированных зернистых материалов в качестве обсыпки слоев керамического покрытия. В качестве зернистых материалов могут выступать: шлифзерно электрокорунда № 16–80, сеяный шамот зернистостью 0,25...1 мм, кварцевый песок марок $1К_1О_202$, $2К_1О_202$, $1К_1О_203$ и др.

Предлагаемая классификация не претендует на полноту охвата всех возможных способов решения проблемы трещиностойкости оболочковых форм. Тем не менее она способствует систематизации имеющейся информации по этой актуальной проблеме, минимизации затрат для ее решения и, по мнению авторов данной статьи, может принести пользу технологу-литейщику при проведении практических работ в условиях действующего производства.

Алгоритм работы с данной классификацией прост и понятен: технолог конкретного предприятия, обладающий полной информацией о возможностях последнего, методом исключения из приведенного списка вариантов выбирает оптимальный и наилучший по его мнению, сосредотачивая свои усилия на его практической реализации, не теряя времени на дополнительный информационный поиск.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Совершенствование** технологических процессов в специальных видах литья / А.И. Евстигнеев, В.В. Петров, Е.А. Чернышов и др. Владивосток: Дальнаука, 2002. 224 с.

2. **Экология** литейного производства / Ю.С. Юсфин, А.Н. Болдин, С.С. Жуковский и др.; под ред. А.Н. Болдина. Брянск: Изд-во БГТУ, 2001. 315 с.

Любовь Игоревна Леушина;
Александр Владимирович Нищёнков, канд. техн. наук;
Роман Николаевич Палавин, канд. техн. наук,
lmps@nntu.nnov.ru

УДК 633.20.84

К.А. Маслов, О.С. Кошелев *(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева),*
С.Г. Самохвалов, А.С. Смирнов *(ОАО "Нижегородский научно-исследовательский институт машиностроительных материалов "Прометей")*

Технологичная жидкостекольная смесь для изготовления стержней в производстве стального литья

Предложено вводить в состав смеси тринатрийфосфат, способствующий повышению ее технологичности.

Ключевые слова: жидкое стекло; смесь; технологичность; тринатрийфосфат; сталь.

Enjection in composition mixture of tribasic sodiums phosphate increasing of its workability is offered.

Keywords: water glass; mixture; workability; tribasic sodiums phosphate; steel.

В литейном производстве чаще всего ставятся вопросы снижения себестоимости, повышения качества и товарного вида отливок, а также повышения экологической безопасности производства. Во многом решение этих вопросов связано с разработкой новых технологичных и оптимизацией существующих составов формовочных и стержневых смесей [1].

Под технологичностью смеси понимают способность смеси формообразовывать внутреннюю полость отливки, отверждаться в определенный период времени, оставаться инертной по отношению к заливаемому сплаву, иметь необходимые податливость, газопроницаемость, хорошую выбиваемость и способность к регенерации, а также быть экологически безопасной.

Всем этим требованиям в значительной степени соответствуют смеси на жидкостекольном связующем. Однако данные смеси имеют существенные недостатки: низкую выбиваемость, недостаточную регенерируемость и склонность к пригару при контакте с металлическими расплавами.

Традиционно выделяют несколько направлений для повышения свойств жидкостекольных смесей: снижение количества жидкого стекла, оптимизацию режимов продувки при CO_2-процессе и ввод технологических добавок [2].

Одним из наиболее простых путей снижения выбиваемости жидкостекольных стержней является уменьшение содержания жидкого стекла в смеси с рекомендуемых 5...7 до 3...4 %. Это ведет к разупрочнению связей пленки жидкого стекла с огнеупорным наполнителем, что способствует снижению общей и особенно поверхностной прочности. В результате при повышении одних технологических свойств (выбиваемость, регенерируемость) снижаются другие (прочностные).

Другим направлением улучшения свойств жидкостекольной смеси является оптимизация режимов продувки при CO_2-процессе.

Во-первых, при этом происходит выдувание паров воды из смеси и повышается концентрация компонентов, что в соответствии с теорией [2] приводит к резкому повышению скорости упрочнения.

Во-вторых, если воздух нагреть, то к первому фактору добавляются ускорение отверждения в результате нагрева смеси и повышение экологической безопасности из-за увеличения скорости протекания процесса.

В-третьих, если струю нагретого воздуха обогатить углекислотой CO_2, то образуется бикарбонат натрия, щелочность раствора снижается, а процесс гидролиза сильной кислоты идет глубже с образованием силиката натрия.

Важным направлением улучшения физико-химических свойств жидкого стекла является ввод технологических добавок (модификаторов), которые изменяют поверхностное натяжение, краевой угол смачивания и вязкость жидкого стекла.

Все модификаторы делят на два класса: органические и неорганические [2, 3].

Неорганические модифицирующие добавки приводят к образованию тройной системы (кварцевый песок+жидкое стекло+неорганическая добавка) с более высокой температурой плавления по сравнению с системой (кварцевый песок+жидкое стекло) либо образуют концентраторы напряжений, что в итоге ведет к снижению прочности. К ним относят: глину, гидрат оксида алюминия, доменный шлак, бентонит, феррохромовый шлак, пылевидные отходы, вермикулит и др.

Органические модифицирующие добавки образуют концентраторы напряжений, способствующие снижению прочности. Среди них чаще всего используют древесный уголь, целлюлозу, крахмал, лигнин, патоку, каменноугольный пек, черный и серебристый графит, нефтяной и каменноугольный кокс, природные смолы, пульвербакелит и др.

В настоящей работе предложено вводить в состав адгезивной оболочки зерновой основы классической жидкостекольной смеси тринатрийфосфат.

Тринатрийфосфат, или трехзамещенный фосфорнокислый натрий (ГОСТ 201–76), может удерживать в своем объеме до 12 молекул воды, образуя при этом

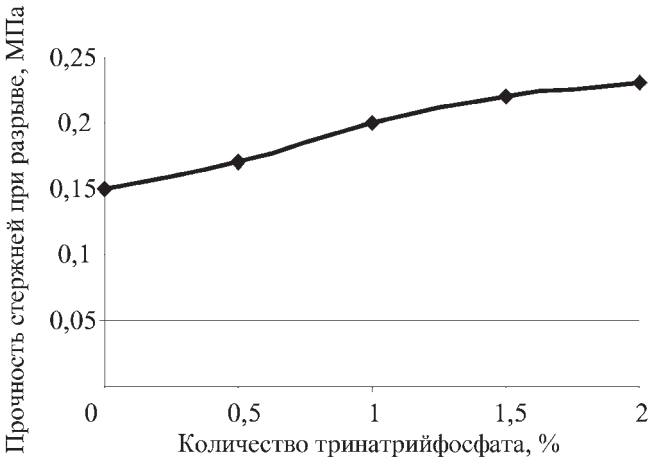


Рис. 1. Прочность стержней при разрыве в зависимости от количества тринатрийфосфата (при 3 % жидкого стекла)

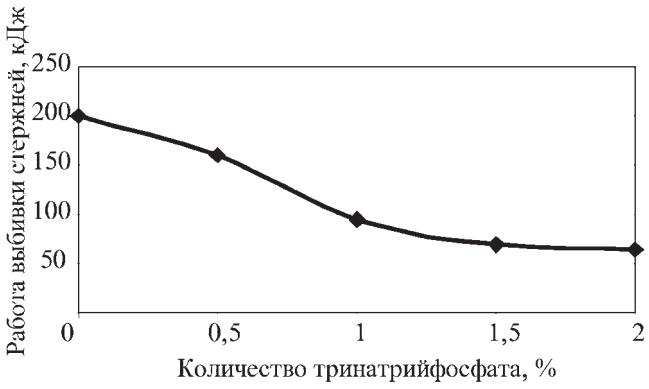


Рис. 2. Работа выбивки стержней в зависимости от количества тринатрийфосфата (при 3 % жидкого стекла)

кристаллогидрат, является хорошим техническим моющим средством, отлично обезжиривает обрабатываемые поверхности. В сухом виде тринатрийфосфат имеет вид чешуек или кристаллов, которые хорошо растворяются в обычной воде, а при высокой температуре его кристаллы становятся пластичными и мягкими.

Эксперименты проводили на площадке опытного литейного участка ОАО "НИИМ "Прометей". Были приготовлены пять экспериментальных составов стержневой жидкостекольной смеси" с различным количеством тринатрийфосфата при определенном уровне жидкого стекла.

В процессе изготовления литейных стержней из жидкостекольной смеси с тринатрийфосфатом продувкой CO_2 наблюдали повышение их общей и поверхностной прочности за счет создания дополнительных связей тринатрийфосфата с наполнителем (рис. 1). Эти данные экспериментально подтверждены фактом обеспечения прочностных свойств смеси с пониженным количеством жидкого стекла 3 % при содержании 1...2 % тринатрийфосфата на том же уровне, что и смеси, содержащей 5 % жидкого стекла.

Для профилактики образования пригара стержни окрашивали разделительным слоем цирконовой краски.

Далее стержни заливали стальным расплавом (110Г13, ГОСТ 977–88) с температурой 1550 °С (изготавливали по 10 отливок для испытаний каждого экспериментального состава).

При температурах свыше 800 °С (после прогрева стержня) тринатрийфосфат, находящийся в смеси, становился пластичным и противостоял спеканию жидкого стекла в глыбу. После затвердевания отливки прочность стержня уменьшалась незначительно. Далее при выбивке оказалось достаточным лишь смочить стержень водой как тринатрийфосфат растворялся, дополнительные солевые связи исчезали, а стержень легко выбивался и создавались хорошие предпосылки для обеспечения регенерируемости смеси (рис. 2). При этом отмечали высокое качество поверхности отливок и отсутствие газовых пузырей под

Технологические свойства смеси с добавками тринатрийфосфата

Параметр	Номер смеси				
	1	2	3	4	5
Тринатрийфосфат, %	0	0,5	1,0	1,5	2
Жидкое стекло, %	3	3	3	3	3
Время перемешивания, мин	5...7	5...7	5...7	5...7	5...7
Газопроницаемость, ед.	140...160	180...200	220...240	260...280	280...300
Прочность смеси при разрыве, МПа	0,14...0,16	0,16...0,18	0,18...0,20	0,20...0,22	0,22...0,24
Газотворность, $см^3/г$	<5	<5	<5	<5	<5
Влажность, %	4,5...4,7	4,3...4,5	4,1...4,3	4,0...4,2	3,8...4,0
Работа выбивки, кДж	200	160	90...100	70...80	60
Живучесть смеси, мин	20...30	20...30	20...30	20...30	20...30

литейной коркой отливок после их механической обработки.

Прочность на разрыв более 0,2 МПа ведет к снижению податливости, а следовательно, повышает вероятность образования горячих трещин на тонкостенных отливках, поэтому ее не увеличивали. При значениях работы выбивки 100...140 кДж можно не применять гидровыбивку, что важно, так как в этом случае регенерация не требует энергоемкой сушки оборотной смеси.

В таблице приведены основные свойства смесей пяти экспериментальных составов.

Из таблицы видно, что смесь № 3, содержащая 1,0 % тринатрийфосфата, обладает оптимальным сочетанием прочности, выбиваемости, газотворности и газопроницаемости при прочих равных условиях. Эта смесь была выбрана в качестве рабочей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Формовочные** материалы и технология литейной формы: справочник / С.С. Жуковский, Г.А. Анисович, Н.И. Давидов и др.; под общ. ред. С.С. Жуковского. М.: Машиностроение, 1993. 432 с.

2. **Илларионов И.Е., Васин Ю.П.** Формовочные материалы и смеси. Ч. 1. Чебоксары: изд-во ЧГУ, 1995. 250 с.

3. **Маслов К.А., Леушин И.О., Плохов С.В.** К вопросу о методах повышения технологичности жидкостекольных смесей // Литейщик России. 2010. № 2. С. 26–29.

Константин Александрович Маслов, канд. техн. наук;
Олег Сергеевич Кошелев, д-р техн. наук;
Сергей Геннадьевич Самохвалов;
Алексей Сергеевич Смирнов,
lmps@nntu.nnov.ru

УДК 621.74.043.2

Д.О. Моисеев *(ОАО "ГАЗ"),* **И.О. Леушин** *(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева)*

Разработка эффективной технической схемы снижения газовой пористости в литье под давлением алюминиевых сплавов

Приведен обзор основных способов уменьшения газовой пористости в отливках литья под давлением: улучшение работы вентиляционной системы (использование игольчатых фильтров), вакуумирование, продувка полости формы инертными газами, "кислородный" процесс; выявлены преимущества и недостатки этих методов. Выполнен анализ видов "кислородного" литья под давлением, целью которого являлось определение так называемых тормозящих факторов. По его результатам предложена эффективная техническая схема снижения газовой пористости в отливках литья под давлением, включающая в себя продувку кислородом и смазывание полости формы одновременно.

Ключевые слова: литье под давлением; пористость; кислородный процесс.

This paper reviews the general ways to reduce gas porosity in castings of the die casting: improvement of the ventilation system (using the needle-filters), vacuum, blowing mold cavity with inert gases, pore-free process. The advantages and disadvantages of these methods are identified. Conducted in-depth analysis of pore-free process. The purpose of which was to determine the so-called "inhibitory" factors. More effective technical scheme to reduce gas porosity in castings of the die castingis is offered based on the analysis. The new method provides simpler and more productive technical scheme, which includes the blowing of oxygen and lubrication of the mold cavity at the same time.

Keywords: die casting; porosity; pore-free process.

Главным недостатком литья под давлением алюминиевых сплавов является газовая пористость отливок, причиной которой выступает главным образом воздух, захватываемый жидким металлом в полости формы и камере прессования, а также выделяемый при термодеструкции смазки.

Установлено, что в алюминиевых отливках при литье под давлением 90 % от общего объема газов в отливках составляет азот, в то время, когда в первоначальной атмосфере формы содержится 19...20 % кислорода. Алюминий вступает в реакцию с кислородом уже при минимальном парциальном давлении кислорода, а специфические условия заполнения формы через щелевые питатели дисперсным потоком и кристаллизации под давлением ускоряют реакцию окисления.

В производственной практике основным способом уменьшения газовой пористости является расчет оптимальных режимов заполнения: фаз, скоростей и давлений. Достаточно часто расчет приводит к необходимости увеличивать давление прессования для обеспечения получения отливки без недоливов, спаев и газовой

пористости. Однако это требует дополнительных энергозатрат [1], снижает темп работы, уменьшает эксплуатационный ресурс пресс-форм и не гарантирует отсутствия в отливках дефектов газового происхождения.

Существуют специальные мероприятия по снижению газовых дефектов в литье:

1. *Улучшение работы вентиляционной системы.* Использование игольчатых фильтров [2] или спеченных из пористых материалов в глухих карманах форм, уменьшает противодавление воздуха в форме и пористость в отливках. Но их применение часто ограничено конструктивными особенностями отливки и конструкции пресс-форм.

2. *Вакуумирование полости формы.* Является наиболее эффективным и дорогостоящим мероприятием по снижению газовой пористости в отливках литья под давлением. Основной проблемой внедрения вакуумирования в действующее производство является переработка всей текущей оснастки, а также усложнение обслуживания машин литья под давлением. В настоящее время это единственный способ, который внедряется на производстве, где требуется высокое качество литья, что связано главным образом с большим числом организаций, производящих оборудование для данного способа.

3. *Продувка камеры прессования и полости формы инертными газами, так называемый "гелиевый" процесс.* Эффективность работы вентиляционной системы зависит также и от молекулярной массы газа: чем меньше молекулярная масса газа, тем он легче покидает полость формы при заливке металла. К недостаткам данного способа следует отнести сравнительно высокую стоимость инертных газов, применение специального оборудования для продувки.

4. *Продувка формы активными газами, в частности, кислородом ("кислородный" процесс).*

Известно несколько вариантов реализации "кислородного" процесса:

4.1. Продувка формы химически активным газом по отношению к алюминию – кислородом. Во время продувки происходит последовательное вытеснение из камеры прессования в рабочую полость формы и далее в вентиляционные каналы воздуха и заполнение их кислородом. Процесс проводят как с вакуумированием до продувки [3], так и вакуумированием после продувки [4]. Недостатками этих способов являются высокие пожаро- и взывовоопасность процесса, а также необходимость использования специальных устройств для продувки [5] и вакуумирования, что усложняет обслуживание машин литья под давлением.

4.2. Применение таблетированных газотворных веществ, которые помещают в рабочую полость перед заливкой [6]. К недостаткам способа относятся опасность разрушения таблетки и замешивания в сплав ее частичек, а также необходимость согласования времени создания химически активной атмосферы в форме при термодеструкции таблетки. Последнее особенно актуально для отливок с развитой поверхностью. Очевидно, что в технологическом цикле появляется дополнительная операция.

4.3. Использование газотворного хромового ангидрида, который наносят на предварительно нагретую до температуры 200...340 °С поверхность пресс-формы [7]. При этом хромовый ангидрид разлагается с выделением кислорода и образованием оксида хрома на поверхности пресс-формы. Недостатком данного способа является сложность регулирования температуры пресс-формы.

4.4. Применение кислородсодержащих веществ, которые вводят в виде порошков в рабочую полость формы в потоке сжатого воздуха после покрытия ее смазкой перед запрессовкой металла [8]. Предложено использовать пероксиды кальция, цинка, калия, хлориды алюминия, марганца и олова, фториды олова и марганца. К недостаткам способа относятся несвоевременность разложения ряда перечисленных выше веществ; низкая эффективность в создании окислительной атмосферы ввиду того, что выделяющиеся кислород, хлор и фтор смешиваются с воздухом в рабочей полости формы и получившаяся газовая смесь выходит через вентиляционные каналы. Применение хлора ведет к возникновению хлорной кислоты в атмосфере цеха, что ухудшает санитарно-гигиенические условия труда персонала.

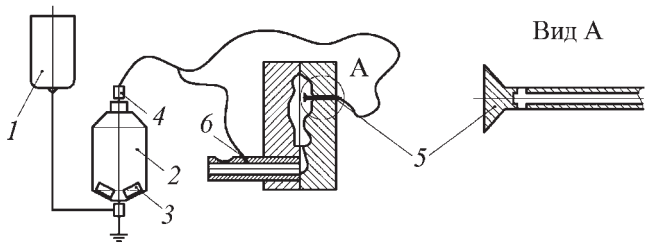
Общим недостатком всех "кислородных" способов является сложность создания атмосферы из активных газов в полости формы вследствие газотворности смазывающего материала. Данная работа направлена на совершенствование "кислородного" процесса и снижение недостатков перечисленных вариантов его реализации.

Для снижения газовой пористости в отливках литья под давлением авторами статьи предложен способ замещения воздуха формы кислородосодержащей пеной, которая будет дополнительно применяться для смазывания и частичного охлаждения полости формы.

Источником кислородосодержащей пены в данном способе служит пероксид водорода. Выбор этого вещества связан главным образом с его невзрывоопасностью при хранении и использовании, а также с возможностью отказаться от баллона с кислородом рядом с литейной машиной.

На рисунке представлена схема установки для получения и передачи кислородосодержащей пены в полость формы.

Из емкости *1* в реакционную емкость *2* поступает смесь пероксида, ПАВ и СОЖ, где происходит разложение пероксида с выделением кислорода и воды, под действием оксида марганца *3* образуется кислородосодержащая пена. Давление в реакционной емкости резко возрастает и при закрытии пресс-формы клапан *4* открывается, и кислородосодержащая пена по гибкому шлангу попадает в полость формы. Пена подается либо через полый шток *5*, управляемый гидроцилиндром, в полости формы, либо через форсунку *6* в камере прессования.



Установка для получения и передачи кислородосодержащей пены

В полости формы под действием температуры пена разрушается, высвобождая кислород, вытесняющий воздух, а вода и СОЖ, образующие защитные пленки, соответственно охлаждают и смазывают формообразующие.

Данная техническая схема успешно вписывается в технологический режим машины литья под давлением, так как в замещении воздуха рабочей полости формы кислородсодержащей пеной объединяются сразу две операции: смазка/охлаждение и продувка кислородом. Продувка кислородосодержащей пеной и смазка формообразующей полости осуществляются в закрытой пресс-форме, что уменьшает расход смазки и загрязнение атмосферы цеха.

В ОАО "ГАЗ" проходят испытания этой установки и патентование новых технических решений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Зеленов В.Н.** Газовый режим процесса литья под давлением // Литейное производство. 1983. № 7. С. 17–19.

2. **Швецов В.Д.** Факторы эффективности вентиляционных устройств формы при литье под давлением // Литейное производство. 1975. № 5. С. 26–28.

3. **А. с. 443717 СССР, М. Кл. B22D 17/14, B22d 27/16.** Способ литья под давлением / А.Ф. Масленников, Л.Г. Донгузова, В.В. Завадский (СССР). № 1853379/22-2; заявл. 06.12.72; опубл. 25.09.74. Бюл. № 35. 2 с.

4. **А. с. 1134289 СССР, МКИ B22D 17/00.** Способ литья под давлением / М.М. Спасская, Г.И. Тимофеев, С.З. Злотин, Н.Ф. Чувагин и др. (СССР). № 3590018/22-02; заявл. 13.05.83; опубл. 15.01.85. Бюл. № 2. 2 с.

5. **А. с. 778924 СССР. М. Кл B22D 17/14.** Устройство для подачи кислорода в форму литья под давлением / В.П. Шевер, А.М. Гурский, О.А. Мороз (СССР). № 2679094/22-02; заявл. 30.10.78; опубл. 15.11.80. Бюл. № 42. 4 с.

6. **А. с. 582898 СССР. М. Кл. B22D 17/00.** Способ литья под давлением / А.Р. Таразов, К.Ф. Аючин (СССР). № 2383666/02-02; заявл. 12.07.76; опубл. 05.12.77. Бюл. № 45. 2 с.

7. **А. с. 448061 СССР. М. Кл. B22D17/00.** Способ смазки пресс-форм литья под давлением / А.Р. Таразов (СССР). № 1918025/22-2; заявл. 04.05.73; опубл. 30.10.74. Бюл. № 40. 1 с.

8. **А. с. 933225 СССР. М. Кл. B22D17/00.** Способ литья под давлением / Г.И. Тимофеев, М.М. Спасская, В.Л. Гаврилов, С.З. Злотин (СССР). № 933225/22-02; заявл. 12.05.80; опубл. 07.06.82. Бюл. № 21. 3 с.

Дмитрий Олегович Моисеев,
mdmitry.bel@gmail.com;
Игорь Олегович Леушин, д-р техн. наук

УДК 669.412:621.047

В.Л. Сивков, В.А. Ульянов, В.Н. Гущин *(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева)*

Рафинирование расплава в промежуточном ковше для литых заготовок под прокат

Рассмотрены вопросы влияния некоторых технологических и конструктивных изменений промежуточных ковшей машин непрерывного литья заготовок на очищение расплава от различных примесных образований.

Ключевые слова: шлаковый слой; вторичное окисление; разливка; расплав; туннельная вставка; заготовка.

Questions of influence of some technological and structural changes of intermediate ladles of machines for continuous casting on purging of melt from the different impurities are considered.

Keywords: slag bulk; secondary oxidation; pouring; melt; tunneling insert; blank.

Известно, что, кроме вносимых из основного разливочного ковша примесных образований, в том числе шлаковых, источником последних являются вихревые образования, возникающие вблизи разливочной трубы и имеющие форму опрокинутого вершиной вниз конуса. Эти данные были получены при внутреннем диаметре защитной трубы 110 мм и глубине погружения последней 150 мм без шлакоуловительной

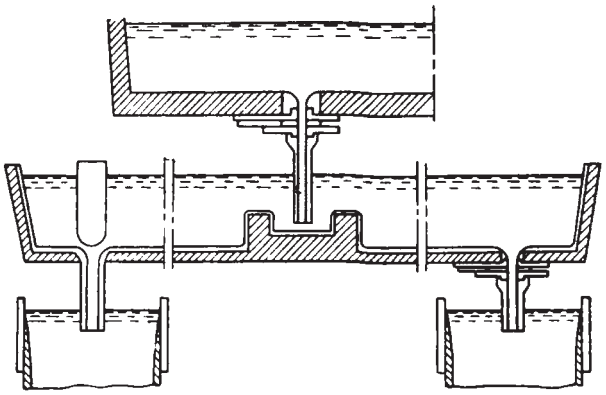


Рис. 1. Промежуточный ковш двухручьевой МНЛЗ

системы в промковше. Образующиеся быстровращающиеся конусовидные воронки в расплаве (их скорость вращения достигает скорости истечения расплава из защитной трубы и более) активно засасывают шлаковый покров мениска, дробят его на мелкие фракции и заносят в нижние слои жидкой ванны ковша. Значительная их часть (до 70 %) попадает через пороги-стенки в разливочные отсеки (в большей мере в ближний разливочный отсек).

На рис. 1 приведена принципиальная схема промежуточного ковша двухручьевой машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), предусматривающая наличие порогов-стенок (не полного профиля) между местом выхода металла на отбойник через удлиненную трубу-стакан из сталеразливочного ковша в промежуточный.

В стационарном режиме разливки труба-стакан позиционирован под уровень ниже шлакового слоя. Практика разливки под уровень свидетельствует о значительном уменьшении затягивания шлака, однако некоторое его количество затягивается. Это зависит от формы и расположения устройств регулирования потоков в промежуточном ковше.

Отмечая прогресс в технологии непрерывной разливки стали, обусловленный мерами, исключающими развитие вторичного окисления, особое внимание исследователи по-прежнему уделяют рассмотрению возможностей рафинирования металла в зависимости от положения и устройства зоны подвода расплава к выпускным стаканам, а также от подбора материалов футеровки рабочего слоя промежуточных ковшей, покровных шлаков.

Конструкция промежуточных ковшей претерпела следующие изменения:

• увеличивается вместимость ковшей (глубина ванны металла);

• широкое распространение получает практика устройства перегородок, порогов;

• организовывается управление передвижением включений путем продувки расплава и их фильтрации через специальные стенки-фильтры и др.

Все эти разработки предваряются моделированием течения металла, сопровождаются изысканиями новых огнеупорных материалов и конструктивных решений.

Таким образом, в сталеплавильном производстве для совмещения высокой производительности с получением продукции высокого качества продукции необходимы более эффективные технологии производства чистой по неметаллическим включениям (НВ) стали. Для этого удаление НВ следует осуществлять на последнем этапе рафинирования – в промковше, обеспечивая наиболее благоприятные условия для всплытия включений и шлака из глубины жидкой ванны. Для реализации этого решения предложены следующие меры:

• обеспечение необходимого времени для всплывания включений за счет укрупнения и увеличения глубины промежуточных ковшей;

• оборудование промежуточного ковша перегородками для регулирования в нем характера движения потоков жидкой стали;

• обеспечение улучшения условий всплытия включений путем подогрева жидкой стали в промежуточном ковше;

• продувка жидкой стали в промежуточном ковше аргоном;

• электромагнитное перемешивание расплава в промковше;

• повышение чистоты жидкой стали в промежуточном ковше путем одновременной разливки из двух разливочных сталеразливочных ковшей;

• герметизация промежуточного ковша.

Однако не решены вопросы стабильности процесса рафинирования:

• в периоды нестабильной разливки, т.е. при замене разливочных ковшей, аварийных ситуациях;

• при изменении температурного режима разливки в процессе опорожнения разливочного ковша;

• при изменении режима разливки и ряда других.

Для поиска наиболее рациональных способов улавливания шлаковых и прочих нежелательных примесных образований (включений) в расплавах требуется системный анализ условий и механизмов, обеспечивающих их всплывание в реальных условиях. К таким условиям и механизмам можно отнести, прежде всего, наличие асимметрии, обеспечивающее преимущественное, накапливающееся перемещение системы расплав–примесные образования в определенном направлении (в общем случае к мениску жидкой ванны) или обеспечивающей получение сил определенного направления при оптимальном физико-химическом состоянии покровного шлака, ассимилирующего эти примесные образования в полной мере.

Большинство физических механизмов движения расплава и примесных образований в нем выяснено на "холодных" моделях. Инициаторами этих механизмов являются различного рода естественные и искусственные асимметрии в системах [1].

К естественным асимметриям в расплавах можно отнести: *начальную*, связанную с переливами жидкого металла, инициирующими вынужденную конвекцию в емкости; *градиентную*, связанную с неоднородностями температуры и плотности расплава, возникающими вследствие несимметричного теплоотвода от

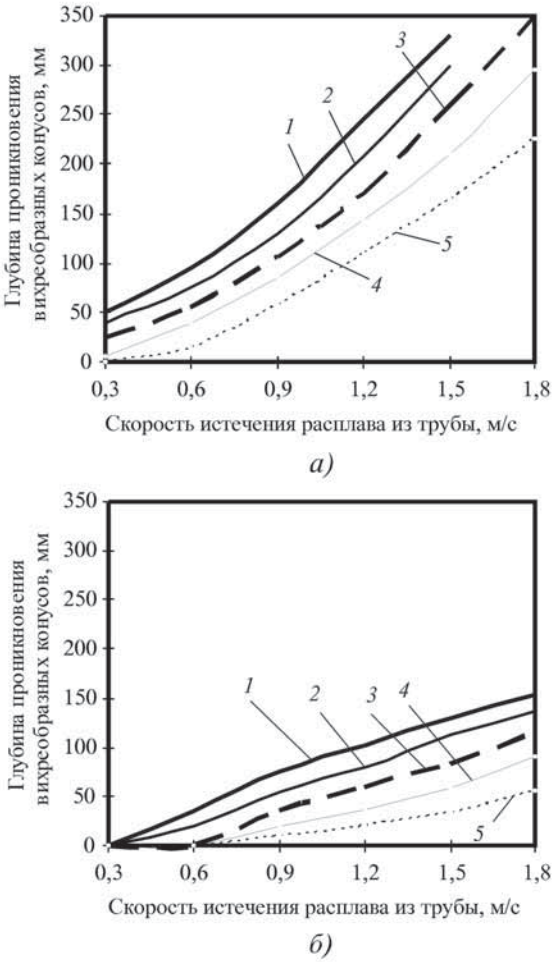


Рис. 2. Глубина проникновения вихреобразных конусов от скорости истечения расплава из трубы и заглубления защитной трубы, мм:
а – без туннельной вставки; *б* – с туннельной вставкой; *1* – 100; *2* – 150; *3* – 200; *4* – 250; *5* – 300

жидкой ванны и инициирующими естественную конвекцию. Эти виды асимметрий вызывают движение примесных образований с потоками расплава, в значительной мере не имеющих благоприятного направления для переноса последних к ассимилирующим шлаковым покрытиям мениска. Наиболее благоприятным для перемещения примесных образований к мениску видом естественной асимметрии является *структурная*, связанная с разностью плотностей расплава и самих примесных образований.

В различных ковшах и формообразующих емкостях, как правило, существует сочетание этих видов асимметрии, что в значительной степени усложняет поиск новых экономически и технологически обоснованных внепечных способов рафинирования и дегазации расплавов. Ввиду невозможности применения точных математических моделей для расчета гидродинамики жидких ванн используют приближенные расчетные методы с учетом результатов физического гидромоделирования [2].

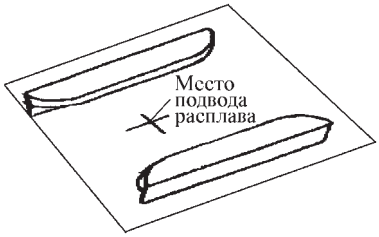


Рис. 3. Пример туннельной вставки

В рис. 2, *а* приведены результаты исследований зависимости максимальной глубины проникновения вихреобразных конусов в глубь жидкой ванны от скорости истечения струи расплава из защитной трубы и заглубления последней. Данные получены при внутреннем диаметре защитной трубы 80 мм при отсутствии шлакоуловительной системы в 50-тонном промковше.

Дополнительной мерой по уменьшению вихреобразований, как показали исследования, является установка туннельных вставок в местах подвода расплава высотой 0,15...0,20 м (рис. 3) между порогами-стенками (см. рис. 1). Влияние туннельных вставок на гидро- и массообменные характеристики разливки при тех же типоразмерах защитной трубы и глубины погружения, что и для рис. 2, *а*, показано и на рис. 2, *б*.

Дополнительные опыты с увеличением внутреннего диаметра $d_{вн}$ защитной трубы до 110 мм против аналогичных опытов с $d_{вн}$ = 80 мм показал следующие результаты:

- увеличение придонных гидропотоков в центральном отсеке на 5...10 %;
- уменьшение скоростей гидропотоков на мениске в этом же отсеке на 17...25 %;
- отсутствие зон на мениске центрального отсека, свободных от шлакового покрова;
- снижение размеров (глубины проникновения) вихреобразных конусов.

Таким образом, на гидродинамику вблизи защитной трубы и интенсивность вихреобразования в значительной степени оказывают размеры, форма выходного отверстия и величина заглубления защитной трубы. В результате этих мероприятий совместно с вихрегасящим устройством в условиях промышленных испытаний на 14...16 % снижено количество неметаллических включений в непрерывнолитых заготовках из стали 40Х.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Гущин В.Н., Ульянов В.А.** Методы исследования и разработка градиентных промышленных технологий управления тепломассообменными процессами при разливке и формировании непрерывнолитых и стационарных заготовок. Нижний Новгород: НГТУ, 2006. 141 с.

2. **Токаги С. и др.** Влияние закрученного потока в погружном стакане на массовый расход в высокопроизводительном кристаллизаторе УНРС // Новости черной металлургии за рубежом. М.: ОАО "Черметинформация", 2002. С. 66–67.

Владимир Лаврентьевич Сивков, д-р техн. наук,
lmps@nntu.nnov.ru;
Владимир Андреевич Ульянов, д-р техн. наук;
Вячеслав Николаевич Гущин, д-р техн. наук

УДК 621.744

В.Л. Сивков, О.И. Чеберяк, М.Ю. Кулагин*, А.В. Ромашевский
(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
** ООО "Метмаш", г. Бор, Нижегородская обл.)*

Опыт применения покровно-проникающих противопригарных покрытий в ООО "Метмаш"

Рассмотрены особенности образования пригара на отливках, изготовляемых с использованием холоднотвердеющих смесей по Alpha-set-процессу. Представлен опыт применения покровно-проникающей противопригарной композиции для крупного стального литья в ООО "Метмаш".

Ключевые слова: холоднотвердеющие смеси; пригар; противопригарные покрытия.

The features of formation metal penetration on casting, made with use cold-set mixtures on Alpha-set-process are considered. The experience of application of cover-penetration antipenetration coatings for large steel casting in LLC "Metmash" is presented.

Keyworld: cold-set mixtures; metal penetration; antipenetration coatings.

Противопригарные покрытия являются наиболее эффективным средством борьбы с самым распространенным литейным дефектом – пригаром при производстве стальных отливок. Как известно, покрытия наносят на поверхность литейных форм и стержней, создавая буферный защитный слой с заданными физико-химическими свойствами. От правильности выбора противопригарного покрытия в значительной степени зависят качество поверхности получаемых отливок, товарный вид, конкурентоспособность готовых литых изделий, и в конечном итоге себестоимость получаемого литья.

В литейном производстве применяют значительное количество противопригарных покрытий с различными физико-химическими свойствами. Нередко возникают сложности с подбором покрытия для конкретных условий получения литых заготовок [1].

В статье представлен опыт использования композиции противопригарных покрытий TENO COATING ZBBP 16 и TENO COATING ZKPX производства компании "ФОСЕКО" для холоднотвердеющих смесей (ХТС) по Alpha-set-процессу в ООО "Метмаш" (г. Бор, Нижегородская обл.).

В ООО "Метмаш" была актуальна проблема образования повышенного пригара на поверхности крупных стальных отливок. Для изготовления форм применяли ХТС на основе жидкого стекла по CO_2- и Alpha-set-процессу на основе связующего Алкасет NB7. Для борьбы с пригаром использовали многослойное покрытие форм противопригарной краской на основе циркона АПБ-1Ц. Трудноотделимая пригарная корка проявлялась на всех крупных стальных литых заготовках.

В качестве примера рассмотрим отливку "шток якоря" массой 4200 кг. Нижняя часть формы для данной отливки была выполнена в плацу на основе жидкого стекла по CO_2-процессу, а верхняя – в опоке по Alpha-set-процессу. Полуформы окрашивали кистью противопригарной краской на основе циркона АПБ-1Ц в четыре слоя. При визуальном контроле полученного литья заметна большая склонность к пригару поверхностей, контактирующих с ХТС по Alpha-set-процессу. При этом больше подвержены пригару места подвода металла и термические узлы отливки (рис. 1).

Известно, что при использовании ХТС на синтетических смолах необходимо учитывать их термостойкость, которая оценивается коксовым числом. Деструкция связующего при высоких температурах с образованием твердого углеродного остатка, способного сохранять прочностные характеристики в течение определенного промежутка времени определяет специфику применения этих смесей. Данную особенность необходимо учитывать при получении крупных стальных отливок, при литье которых возникают наиболее "жесткие" физико-химические условия на границе раздела металл–форма. С момента, когда сформированный при высоких температурах углеродный остаток те-

Рис. 1. Пригар на отливке "шток якоря"

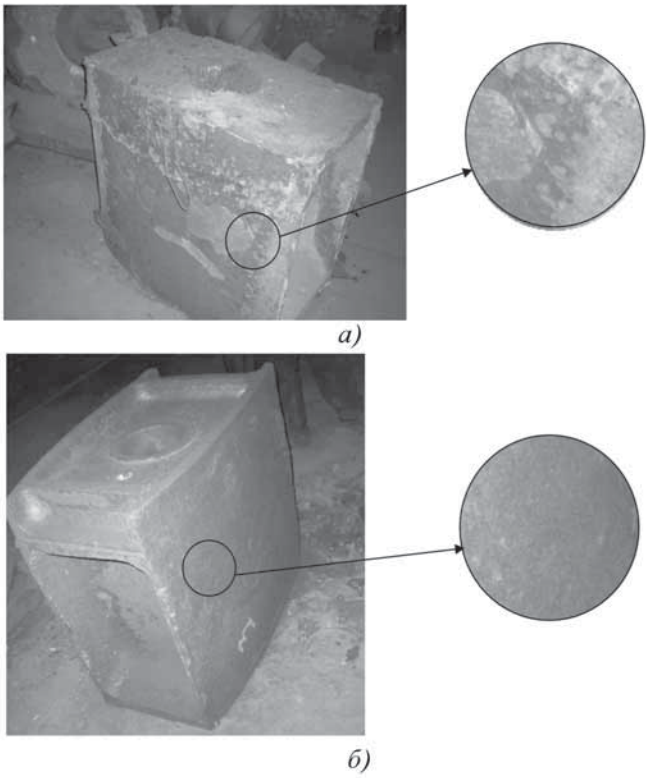


Рис. 2. Фотографии отливок "ступица":
а – отливка из формы, окрашенной АПБ-1Ц; *б* – отливка из формы, окрашенной композицией покрытий TENO COATING ZBBP 16 и TENO COATING ZKPX

ряет прочностные характеристики, проникновение металла в поры формовочной смеси резко усиливается. Это связано с тем, что зерна наполнителя получают возможность произвольно перемещаться под давлением залитого металла. Смесь, теряя поверхностную прочность, оказывает слабое капиллярное сопротивление фильтрации металла, что увеличивает глубину его проникновения в поры литейной формы.

Использование проникающих противопригарных покрытий, позволяющих укрепить поверхность формы и придать ей большую термостойкость в более продолжительный промежуток времени, позволяет снизить или полностью устранить пригар на крупных стальных отливках.

Одно из таких противопригарных покрытий – TENO COATING ZKPX производства компании "ФОСЕКО". Применение этого покрытия значительно снижает пригар на крупных отливках. Однако, по данным компании "ФОСЕКО", больший эффект достигается при использовании композиции, в которой роль проникающего состава играет TENO COATING ZKPX, а TENO COATING ZBBP 16 применяется в качестве кроющего состава.

Сравнительные испытания двух вариантов окраски форм были проведены на отливке "ступица" массой 1560 кг. Отливки были заформованы в опоки с использованием смеси по Alpha-set-процессу на основе связующего Алкасет NB 7. Одна отливка была окрашена краской АПБ-1Ц в четыре слоя (традиционная технология), а другая – комбинацией покрытий TENO COATING ZBBP 16 и TENO COATING ZKPX. В обоих случаях окрашивание осуществляли кистью вручную. На рис. 2 приведены фотографии полученных отливок.

Как видно на рис. 2, *а*, большая часть поверхности литой стальной заготовки, выполненной по старой технологии, покрыта пригарной коркой, а на рис. 2, *б* отливка имеет чистую поверхность даже в местах, склонных к повышенному пригару, а именно в месте подвода металла к полости формы и сопряжения прибыли с отливкой, она получена в форме, окрашенной противопригарной композицией TENO.

Таким образом, доказано, что покрытия TENO значительно превосходят по своим противопригарным свойствам краску АПБ-1Ц и могут успешно использоваться при производстве крупных стальных отливок в формах из ХТС по Alpha-set-процессу на основе связующего Алкасет NB 7.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Болдин А.Н.** Литейные формовочные материалы. Формовочные, стержневые смеси и покрытия: справочник. М.: Машиностроение, 2006. 507 с.

Владимир Лаврентьевич Сивков, д-р техн. наук,
mlp@nntu.nnov.ru;
Олег Иванович Чеберяк, канд. техн. наук;
Михаил Юрьевич Кулагин;
Андрей Вадимович Ромашевский

УДК 621.791.927.5

А.В. Собачкин, В.И. Яковлев, А.А. Ситников
(Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова)

Применение методов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и механоактивационной обработки для создания новых наплавочных материалов

Статья посвящена актуальной теме получения порошковых наплавочных материалов нового класса методом механически активируемого самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Подробно рассмотрены технологии механоактивационной обработки и СВС, приведена методика получения порошковой смеси для сердечника порошкового электрода (проволоки). Изучен характер износа изделий, наплавленных экспериментальным составом. Установлено, что введение в поверхностный слой высокотвердых частиц (карбидов металлов) с помощью порошковых электродов из СВС-материалов существенно повышает износостойкость наплавленного слоя. Это позволит в 3–5 раз увеличить срок службы деталей машин и агрегатов, эксплуатирующихся в условиях химически агрессивной внешней среды и высокого абразивного изнашивания.

Ключевые слова: механоактивационная обработка; самораспространяющийся высокотемпературный синтез; композиционный материал; порошковый электрод; электродуговая наплавка.

The article is devoted to the important topic of obtaining of powder surfacing new class materials by mechanically activated self-propagating high temperature synthesis (SHS). Technologies mechanical and activation treatment processing and self-propagating high temperature synthesis are discussed in detail, method of obtaining powder mixture for powder core electrode (wire) is presented. The character of wear of items welded by experimental composition electrode is studied. It is established that the introduction to the surface layer of very hard particles (carbides) with electrodes made of powder SHS-materials significantly increases the wear resistance of the welded layer. This would allow 3–5 times increase the service life of machine parts and units operated in chemically aggressive environment and high abrasive wear.

Keywords: mechanical and activation treatment; self-propagating high-temperature synthesis; composite material; arc welding.

Электродуговую наплавку широко применяют в производстве и реновации деталей, узлов и агрегатов машин и механизмов различных отраслей промышленности. В результате наплавки при изготовлении деталей можно получить рабочую поверхность, обладающую необходимым комплексом свойств: износостойкостью, термостойкостью, жаростойкостью, коррозионной стойкостью и т.п. При ремонте наплавка позволяет восстановить первоначальные размеры и эксплуатационные свойства деталей.

В настоящее время возрастает актуальность использования восстановленных деталей при ремонте автомобилей, автотракторной и сельскохозяйственной техники, пищевого и промышленного оборудования. Используя наплавку, можно уменьшить расход металла на изготовление запасных частей оборудования. При восстановлении изношенных деталей затраты на материалы и число технологических операций сокращается в 5–8 раз, что по сравнению с изготовлением новых деталей способствует экономии металла, топливно-энергетических и других природных ресурсов [1].

В результате модифицирования поверхности детали можно значительно увеличить срок службы оборудования в целом, что особенно важно, если от надежности и долговечности последнего зависит работа высокопроизводительного оборудования, а замена таких деталей связана с длительными простоями агрегатов. Этим обусловлена большая экономическая и техническая эффективность наплавки в практически любой отрасли машиностроения.

Эффективность наплавки определяется правильным выбором состава наплавленного металла исходя из условий работы детали и основного вида изнашивания. Наплавочные материалы выбирают с учетом условий эксплуатации восстанавливаемой детали, вида защиты, конструктивных особенностей детали и имеющегося оборудования [2].

Одним из эффективных способов достижения высокой износостойкости является введение в поверхностный слой изделия твердых сплавов, таких как тугоплавкие карбиды металлов. Износостойкость рабочей поверхности существенным образом зависит от типа и количества твердой фазы в полученном поверхностном слое. Например, путем больших усилий и энергозатрат металлургически удается ввести в изделие упрочняющую фазу в виде определенного содержания карбидов: Fe_3C; Mn_3C; Cr_7C_3; W_2C; WC; VC; TiC; B_4C; Mo_2C и др., а также карбоборидов, нитридов железа и легирующих элементов.

Однако технология изготовления легированной и высоколегированной такими компонентами наплавочной проволоки сплошного сечения, необходимой

для износостойкой наплавки, является очень трудоемким, сложным, дорогим и экономически невыгодным процессом, целесообразна только для крупных комбинатов и метизных заводов, так как технология волочения с малыми обжатиями и многократными промежуточными отжигами связана с большими затратами средств и времени.

Производство высоколегированных электродных материалов для наплавки относительно просто решается с помощью порошковой проволоки. По сравнению с проволоками сплошного сечения порошковые проволоки обеспечивают более значительные возможности для легирования наплавленного металла. Порошковая наплавочная проволока представляет собой трубчатую проволоку, заполненную порошкообразным наполнителем.

Порошкообразный наполнитель представляет собой смесь ряда компонентов, которые выполняют функции, аналогичные функциям электродных покрытий, – защиту металла от воздуха, стабилизацию дугового разряда, раскисление и легирование шва, формирование шва, регулирование процесса переноса электродного металла и др. Введение в состав электродной шихты порошков компонентов, обладающих высокой твердостью, может способствовать значительному повышению износостойкости и других механических характеристик наплавленного слоя металла.

Однако существующие методы получения высокотвердых карбидов, боридов, нитридов металлов, такие как сплавление компонентов в корундовых тиглях, кварцевых ампулах, герметично заваренных танталовых контейнерах, характеризуются значительными энергетическими затратами, сложностью и многостадийностью технологических циклов (атмосфера аргона при повышенном давлении, отлив в изложницы, длительный гомогенизирующий отжиг), малой производительностью и не всегда обеспечивают требуемое количество и качество материалов по чистоте.

В связи с этим, можно сделать вывод, что известные и используемые до этого времени материалы для производства порошковых наплавочных материалов в целях повышения износостойкости деталей не удовлетворяют современным потребностям предприятий различных отраслей промышленности по своим физическим, механическим свойствам либо по их стоимости. Необходимо создание новых материалов или композитов, отвечающих требованиям работы изделий на их основе в заданных условиях среды.

Современные способы наплавки и обработки, применяемые при производстве новых и восстановлении изношенных деталей, должны обладать следующими свойствами [1]:

– максимальной универсальностью;

– обеспечивать технические характеристики и ресурс восстановленных деталей не ниже требований технических условий на новую деталь;

– иметь высокую производительность и технологическую устойчивость;

– базироваться на недорогом и доступном оборудовании;

– использовать имеющиеся на рынке материалы;

– обладать высокой экологичностью.

Таким образом, метод наплавки порошковыми электродами или порошковой проволокой отвечает указанным требованиям, кроме применяемых в настоящее время порошковых материалов для сердечника электрода (проволоки) и способов их производства.

По данным [3, 4], одним из перспективных методов получения порошковых материалов является самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС). В основе метода СВС лежит реакция экзотермического взаимодействия двух или нескольких химических элементов, протекающая в режиме направленного горения после локального инициирования процесса.

Специфическое преимущество СВС-процессов заключается в отсутствии или существенном снижении энергозатрат за счет использования экзотермического эффекта реакций и в высокой скорости синтеза. Благодаря таким особенностям СВС, как высокая температура, превышающая в большинстве случаев температуру плавления хотя бы одного из реагентов, высокая скорость внутреннего саморазогрева, протекание реакций в условиях резкого градиента температур, метод позволяет получать материалы с повышенными свойствами, а в ряде случаев синтезировать композиции, получение которых другими известными способами требует больших затрат и/или сложного дорогостоящего оборудования либо вообще невозможно. Однако, несмотря на очевидные преимущества синтеза материалов методом СВС, основным фактором, сдерживающим широкое промышленное применение метода, является проблема воспроизводимости структуры и свойств материалов в условиях самоорганизации процесса [3].

Эффективным средством, позволяющим целенаправленно влиять на структурное состояние реакционной шихты и параметры СВС, обеспечивая возможность регулирования механизмов фазо- и структурообразования материалов в процессе синтеза, а также воспроизводимость результатов, является предварительная механоактивационная обработка [5].

Относительно новым является метод механически активируемого самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, основанный на сочетании механоактивации и СВС и представляющий собой двустадийный процесс. На первом этапе реакционная шихта обрабатывается в течение сравнительно короткого времени в энергонапряженном аппарате – активаторе, на втором – используется в качестве реакционной смеси для СВС.

Целью работы является апробация технологии механически активируемого самораспространяющегося высокотемпературного синтеза для создания порошковых наплавочных материалов нового класса.

Так, в НИЛ СВС-Материаловедения АлтГТУ было предложено использование в качестве компонентов электродной шихты порошков материалов, полученных методом механически активируемого самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Это позволяет широко применять составы порошковых сердечников и создавать такие смеси электродного материала, которые чрезвычайно трудно, а иногда и просто невозможно получить другими техническими способами. Например, экспериментально опробован способ введения в сердечник порошкового электрода упрочняющей фазы в виде карбида титана, синтезированного в никель-хромовой матрице. Наплавка разработанным порошковым электродом обеспечивает такой химический состав наплавленного металла, который чрезвычайно трудно получить обычным металлургическим путем.

Рассмотрим более подробно способ получения электродной порошковой шихты – механически активируемый самораспространяющийся высокотемпературный синтез.

Известно, что в основе СВС лежит использование тепла, которое выделяется при сильноэкзотермической реакции взаимодействия реагентов. СВС представляет собой типичный неизотермический процесс, характеризующийся экстремальными условиями синтеза: высокими скоростями нагрева исходных компонентов (10^3...10^6 °С/с), резким градиентом температуры (до 10^5 К/см), высокими температурами (до 4000 К) и малым временем синтеза (от долей секунд до нескольких минут) [3].

В зависимости от условий СВС может протекать в двух режимах: послойного горения и объемного теплового взрыва. Например, в режиме послойного горения химическая реакция после ее локального инициирования самопроизвольно перемещается по веществу в виде узкой зоны (волны горения). Тепло, подводимое к поверхности образца, прогревает поверхностный слой и инициирует экзотермическую реакцию. Вблизи поверхности формируется фронт горения, который начинает самопроизвольно распространяться вдоль образца. Температура в волне горения изменяется от начальной до максимальной за счет тепловыделения химических реакций температуры горения. Температура горения играет важную роль в протекании процесса СВС и формировании конечных продуктов горения. Также известно, что СВС в многокомпонентных системах позволяет получать сложные легированные соединения. Дополнительное использование механоактивации существенно расширяет возможности таких материалов.

Следует отметить, что механоактивация позволяет модифицировать условия протекания СВС-процессов. Вопросам экспериментального исследования механоактивации на параметры СВС посвящено много работ [3, 5]. Большинство авторов в качестве основных видов воздействия механоактивации на СВС отмечают существенное снижение температуры и времени начала взаимодействия реагентов, увеличение скорости химических реакций и повышение полноты превращения для активированных систем. Кроме того, механоактивация позволяет существенно изменять величину и характер тепловыделения, температуру и скорость горения, а также механизм и кинетику процессов взаимодействия компонентов (условия протекания химических реакций и их стадийность).

Обычно при изучении влияния механоактивации на гетерогенные реакции авторы рассматривают два типа воздействия, которые условно можно обозначить как микроструктурные и энергетические. Микроструктурные воздействия сводятся к измельчению реагентов и увеличению площади контакта между ними, что приводит к ускорению реакции. Энергетические воздействия связываются с аккумулированием дополнительной энергии в кристаллической решетке вследствие накопления остаточных упругих или пластических деформаций при механическом воздействии. Во многих случаях микроструктурные и энергетические аспекты действуют совместно и различить их сложно [3]. Влияние механоактивации на параметры СВС объясняют влиянием дефектов кристаллического строения и соответствующей энергии, накопленных в металле при периодической пластической деформации во время механоактивации, а также снижением эффективной энергии активации реакции при последующем нагреве в волне СВС.

СВС-реакцию можно проводить и с использованием "инертных" в химическом плане добавок (матриц), в этом случае реакция синтеза предварительно механоактивированных веществ происходит в объеме этой матрицы. Подобные добавки являются эффективным средством модифицирования структуры СВС-материалов.

"Инертные" матрицы, не меняющие процессы химического реагирования, снижают температуру и скорость горения и приводят к сильному модифицированию структуры СВС-материалов (существенно уменьшается размер зерна, повышается однородность структуры). Это связано с тем, что, выполняя функции относительно инертного разбавителя, матрицы одновременно являются дополнительными центрами кристаллизации на ранней стадии структурообразования, способствуя процессу гетерогенного зародышеобразования уже на стадии первичного структурообразования. При этом тормозятся процессы рекристаллизации и роста зерен в волне горения. Дополнительное использование механоактивации не только обеспечивает равномерное распределение реагирующих частиц по объему матрицы, но и влияет на морфологию и дефектность структуры порошковых смесей.

В общем случае продукт механически активируемого самораспространяющегося высокотемпературного синтеза характеризуется более тонкой и гомогенной структурой при повышенной глубине превращения по сравнению с СВС-продуктами без применения

механоактивации. При этом в зависимости от типа активатора и режима механообработки можно существенно менять как механизм процесса, так и фазовый состав получаемого продукта. Кроме того, особенности взаимодействия реагентов в механоактивированных материалах (снижение температуры и увеличение скорости химического реагирования) обеспечивают возможность проведения процесса на воздухе без окисления. Механоактивация позволяет получать методом СВС легированные материалы с повышенной концентрацией легирующих элементов (выше значения предельной растворимости).

Для достижения высококачественного результата при использовании механически активируемого самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в работе [6] предложена технологическая схема получения СВС-порошков для детонационного напыления.

Первой операцией в этой схеме является подготовка порошка. Данный этап немаловажен и в случае применения технологической схемы для изготовления порошкообразного электродного наполнителя. Так, подготовка компонентов электродной шихты и условия проведения этой подготовки во многом определяют свойства наплавленного покрытия: равномерность наплавленного слоя, однородность его структуры и отсутствие дефектов наплавки.

В качестве материалов для изготовления порошкового электрода использовали порошки титана, углерода и наплавочного порошка на основе никель-хрома. Эти компоненты электродной шихты должны отвечать определенным требованиям. Главными из них являются степень насыщения порошка влагой и грануляция исходного порошкового состава. Крупность частиц порошков, входящих в состав шихты, определяет сыпучесть последней и, как следствие, – качество дозирования при заполнении электрода и наплавке им изделия. Поэтому в порошках, используемых для изготовления порошковой электродной смеси, нежелательно наличие пылевидной фракции с размером частиц менее 0,05 мм и крупных частиц с размером, превышающим 0,3 мм.

На сыпучесть электродной шихты оказывает влияние и степень насыщенности порошков парами влаги. В зависимости от гигроскопичности определенного компонента шихты должно варьироваться время и температура сушки. Поэтому для установления наиболее рациональных режимов подготовки электродной шихты были проведены исследования сыпучести порошков по ГОСТ 20899–98.

Первой операцией методики подготовки порошковой электродной шихты является сушка (прокалка). По данным А.В. Людаговского (Газотермическое напыление покрытий: учеб. пособие. М.: РГОТУПС, 2006. 43 с.), сушку металлических порошков следует проводить при температуре 120...150 °С, оксидные порошки прокаливать при 400... 600 °С. Порошки засыпают в противни толщиной засыпки 10...15 мм, время сушки составляет 2...5 ч при периодическом перемешивании.

Исследования сыпучести порошков электродной шихты показали, что рекомендуемым временем просушки порошка углерода следует считать 15...20 ч при температуре 130...150 °С, а режимы просушки порошков титана и никель-хрома для уменьшения потребления электроэнергии можно снизить до 10 ч при температуре 100...110 °С, что объясняется большей гигроскопичностью порошка углерода.

Следующей операцией методики подготовки электродной шихты является проведение классификации каждого из ее компонентов. Для этого использовали набор сит, применяемый для определения гранулометрического состава по ГОСТ 18318–94. Исходя из приведенных выше рекомендаций, нижней границей размера ячейки сита является 50 мкм. Верхняя граница снижена от рекомендованного значения до 200 мкм в связи с необходимостью дальнейшего проведения реакции синтеза в электродной смеси. На основании изучения сыпучести порошков электродной шихты установлено, что порошки дисперсностью 50...63 мкм обладают неудовлетворительной текучестью, поэтому следует отказаться от использования порошков данной фракции в составе электродной шихты.

В табл. 1 в качестве примера приведены результаты исследования по ГОСТ 20899–98 порошка одного из компонентов применяемой электродной шихты.

На следующем этапе для получения требуемого композита подготовленные порошки углерода, титана и никель-хрома смешивают в определенном соотношении. Затем порошковую смесь подвергают механической активации в планетарной шаровой мельнице-активаторе АГО-2С в течение заданного интервала времени. Исходные порошки в зависимости от способа получения могут иметь различную форму частиц – от правильной глобулярной до осколочной. Однако после обработки порошковой смеси в активаторе ее частицы приобретают характерную осколочную форму, а смесь представляет собой слоистый композит. Для подтверждения наличия слоистой структуры образцы композита исследованы с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ), результаты приведены на рис. 1.

Затем в полученной смеси проводится СВС-реакция, необходимая для синтеза карбида титана в никель-хромовой матрице. Синтез осуществлялся в ре-

1. Среднее время истечения, с, порошка углерода дисперсностью 100...200 мкм

Время сушки, ч	Температура сушки, °С		
	100	120	140
5	294,9	182,6	108,7
10	235,1	167,3	94,3
15	193,1	114,8	76,5

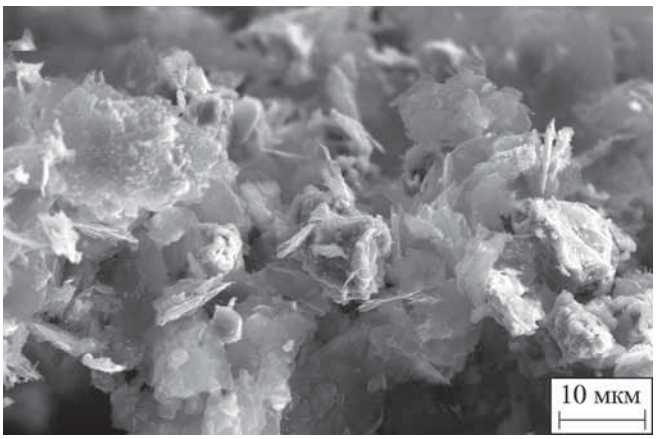


Рис. 1. РЭМ-изображение порошковой смеси исходного механокомпозита после обработки в активаторе

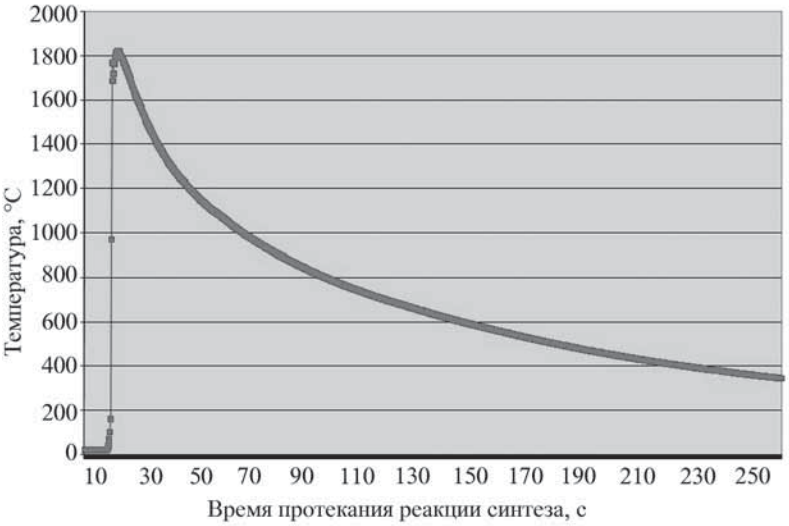


Рис. 2. Термограмма СВ-синтеза карбида титана в никель-хромовой матрице

жиме фронтального послойного горения без создания дополнительных условий его протекания. Термограмма проведения СВС-реакции была получена контактным методом с помощью специальной компьютерной программы, имеет характерный вид температурной зависимости для механоактивированных систем и подтверждает изложенные выше данные по характеру влияния механоактивации на протекание реакции самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (рис. 2).

В результате реакции синтезируется требуемый композит вида TiC+NiCr с выбранным процентным содержанием металла матрицы. Результаты РЭМ-анализа приведены на рис. 3. Полученная смесь является готовым порошком для наплавки.

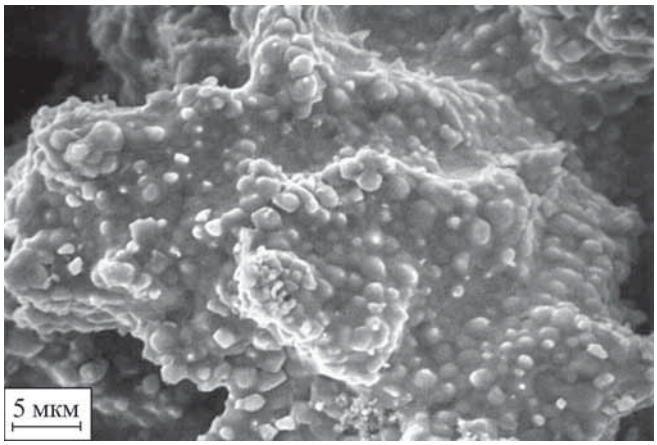


Рис. 3. РЭМ-изображение продукта СВС-реакции

Для проведения экспериментальной наплавки и установления практической возможности использования СВС-порошков в целях создания на поверхности изделия износостойкого слоя применяли порошковый электрод, содержащий смесь механоактивированных СВС-композитов состава TiC + *x* % NiCr. Наплавку осуществляли на образцы из стали 45.

В работах [7, 8] установлено, что микротвердость наплавленного слоя при использовании данных электродов в несколько раз превосходит микротвердость материала основного металла (сталь 45) и возрастает при увеличении процентного содержания карбидов в матрице наплавочного порошка. Исходя из этого, можно прогнозировать значительный прирост к износостойкости кромок рабочих органов сельхозмашин.

Для подтверждения этого в лабораторных условиях были проведены исследования по определению массового износа покрытий в зависимости от степени разбавления металлом матрицы.

В качестве испытательного оборудования использовали машину трения, предназначенную для испытаний различных фрикционных и смазочных материалов на трение и износ с максимальным моментом трения 40 Н·м и максимальной частотой вращения шпинделя 3000 мин$^{-1}$.

Параметры испытаний выбирали согласно ГОСТ 17367–71.

Исследования проводили с использованием специально изготовленных образцов, представляющих собой гладкие цилиндрические образцы соответствующих размеров. В качестве абразивного материала был выбран диск, изготовленный из абразивной листовой шкурки марки Л2Э620×50С115А25-ВМА (ГОСТ 6456–82). В качестве абразивного материала применяли электрокорунд нормальный А15 зернистостью 25 (ГОСТ 3647–71).

Результаты испытаний по определению массового износа наплавленных покрытий в зависимости от степени содержания металла матрицы в смеси представлены в табл. 2 и на рис. 4.

2. Результаты исследования износостойкости наплавленных покрытий

Номер испытания	Массовый износ, г			
	Степень содержания металла матрицы, % мас.			Сравнительное испытание (сталь 45)
	90	80	70	
1	0,0487	0,0523	0,0372	0,2581
2	0,0391	0,0341	0,0259	0,2422
3	0,0471	0,0382	0,0228	0,2329
4	0,0464	0,0302	0,0132	0,2174
5	0,0352	0,0273	0,0155	0,2283
6	0,0487	0,0523	0,0372	0,2581

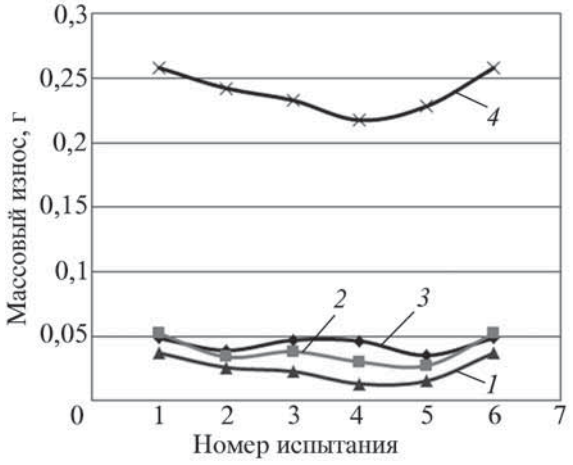


Рис. 4. Массовый износ наплавленных покрытий в зависимости от степени содержания металла матрицы в смеси: *1* – 70 %; *2* – 80 %; *3* – 90 %; *4* – сталь 45

Установлено, что наплавленные дуговым способом покрытия из порошков СВС-механокомпозитов состава TiC + *x* % NiCr со степенью содержания металла матрицы 90 % имеют меньшую сопротивляемость изнашиванию, что можно объяснить более высоким содержанием металла матрицы. При снижении степени содержания в композите металла матрицы повышается интенсивность перехода карбидообразующих элементов из порошков СВС-механокомпозитов в наплавленный металл, что обеспечивает повышение износостойкости и твердости покрытия.

Выводы

Метод механически активируемого самораспространяющегося высокотемпературного синтеза позволяет создавать и использовать порошковые СВС-материалы в качестве сердечника порошкового электрода (проволоки). Применение подобных порошковых электродов (порошковой проволоки) для электродуговой наплавки обеспечивает оптимальную структуру наплавленного слоя с равномерным распределением упрочняющего зерна по объему наплавки [10].

Результатом наличия такой структуры является высокая микротвердость рабочей поверхности изделия и, как следствие, хорошая сопротивляемость абразивному износу.

Таким образом, применяемый способ повышения износостойкости с помощью порошковых электродов из СВС-материалов позволит существенно (в 3–5 раз) увеличить срок службы быстроизнашивающихся деталей и узлов (в частности, рабочих органов сельскохозяйственной техники, например стрельчатых лап культиваторов и сеялок).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Перспективные** способы наплавки и механической обработки восстанавливаемых деталей / А.В. Иванов, О.Л. Пирозерская // Технико-технологические проблемы сервиса. 2010. № 3 (13). С. 7–9.

2. **Реновация** деталей металлургического оборудования наплавкой / Ф.П. Кащенко, А.И. Беляев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2006. № 1. С. 3–6.

3. **Влияние** механоактивации на процессы фазо- и структурообразования при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе / Н.З. Ляхов, Т.Л. Талако, Т.Ф. Григорьева. Новосибирск: Параллель, 2008. 168 с.

4. **Интегральные** технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / В.В. Евстигнеев, Б.М. Вольпе, И.В. Милюкова, Г.В. Сайгутин. М.: Высшая школа, 1996. 284 с.

5. **Влияние** механической активации исходных компонентов на СВС силицидов ниобия / О.А. Шкода, О.Г. Терехова, Л.Д. Чалых // Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: материалы и технологии. Новосибирск: Наука, 2001. С. 216–221.

6. **Евстигнеев В.В.** Проблемы и направления развития промышленных интегральных СВС-технологий // Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: материалы и технологии. Новосибирск: Наука, 2001. С. 19–31.

7. **Структура** и свойства наплавленных электродуговых покрытий из порошков механоактивированных СВС-композитов / А.А. Ситников, В.И. Яковлев, М.Н. Сейдуров, М.Е. Татаркин, А.В. Собачкин, Н.В. Степанова, И.Ю. Резанов // Обработка металлов. 2011. № 3 (52). С. 51–54.

8. **Покрытия** из механоактивированных СВС-материалов для рабочих органов сельскохозяйственных машин, наплавленные ручным дуговым способом / А.А. Ситников, В.И. Яковлев, А.В. Собачкин, М.Н. Сейдуров, М.Е. Татаркин // Ползуновский вестник. 2012. № 1/1. С. 273–277.

9. **Износостойкие** покрытия из СВС-материалов, наплавленные порошковым электродом / А.В. Собачкин, А.А. Ситников, В.И. Яковлев // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе: материалы 10-й Всероссийской науч.-практ. конф. Новосибирск: Изд-во Новосибирского государственного техн. ун-та, 2012. С. 199–203.

Алексей Викторович Собачкин,
anicpt@rambler.ru;
Владимир Иванович Яковлев, канд. техн. наук;
Александр Андреевич Ситников, д-р техн. наук

УДК 621.735.32:621.882

В.В. Галкин, С.А. Кудрявцев, Е.Г. Терещенко
(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева),
А.А. Дербенев *(ОАО "Нижегородский авиастроительный завод "Сокол")*

Методика расчета конечных пластических деформаций металлоизделий, изготовленных многопереходными процессами холодной объемной штамповки

Предложена методика расчета конечных пластических деформаций металлоизделий, изготовляемых в многопереходных процессах объемной штамповки, на примере холодной высадки шестигранного болта с фланцем и двенадцатигранной гайки с фланцем. Значение конечной пластической деформации выделенной зоны крепежного изделия определено как арифметическая сумма интенсивностей деформаций в соответствующей зоне заготовки на переходах высадки. Расчет интенсивностей деформаций проведен микроструктурным методом Г.А. Смирнова-Аляева с использованием программного обеспечения NI Vision и среды разработки LabVIEW фирмы National Instruments для автоматизированного расчета компонентов деформированного состояния по микроструктурам, полученным на шлифах заготовки.

Ключевые слова: конечные пластические деформации; интенсивность деформаций; исследуемые зоны заготовки на переходах высадки.

The design procedure of final plastic deformations of the hardware produced in many transients of volume punching on example of cold disembarkation flange bolt and 12-pointscrew nuts with flange is offered. Value of final plastic deformation of the allocated zone of fixing product is defined as the arithmetic sum strengths deformations in corresponding zone of preparation on disembarkation transitions. Calculation strengths deformations was spent by G.A. Smirnov-Aljaev's microstructural method from use of software NI Vision and the environment of working out LabVIEW of firm National Instruments for the automated calculation of components of the deformed condition on the microstructures received on slice preparations.

Keywords: final plastic deformations; intensity of deformations; investigated zones of preparation on disembarkation transitions.

Математический расчет конечных пластических деформаций материальной точки в общем виде предложен в 1958 г. А.А. Илюшиным, который в формулировке Г.А. Смирнова-Аляева изложил следующим образом: "степенью деформации любой материальной частицы тела следует называть арифметическую сумму интенсивностей последовательных малых деформаций, в результате которых осуществляется данное ее конечное (окончательное) формоизменение". Очевиден вопрос о правомерности данного положения при расчете конечных пластических деформаций исследуемой зоны штампованного изделия в многопереходных процессах холодной объемной штамповки, имеющих, как правило, смену схемы формоизменения, что свидетельствует об актуальности исследования поставленной задачи.

В данной работе в качестве объекта исследования были выбраны процессы холодной высадки крепежных изделий: шестигранного болта с фланцем и двенадцатигранной гайки с фланцем.

При холодной штамповке в металле отсутствуют рекристаллизационные процессы. Это позволило в данном исследовании для оценки деформированного состояния металла использовать микроструктурный метод Г.А. Смирнова-Аляева с применением автоматизации процедур замеров и расчетов его параметров на основании использования программного обеспечения NI Vision в среде разработки LabVIEW фирмы National Instruments [1].

Для оценки достоверности полученных результатов использован стандартный метод оценки изменения деформированного состояния материала путем замера его твердости, основанный на положении, что между деформированным состоянием и прочностными характеристиками металла за счет упрочнения наблюдается корреляция. Для углеродистых сталей соотношение между временным сопротивлением при растяжении и твердостью материала определяется зависимостью Г. Деля:

$$\sigma_в = (0{,}33 \ldots 0{,}36)\mathrm{HV}.$$

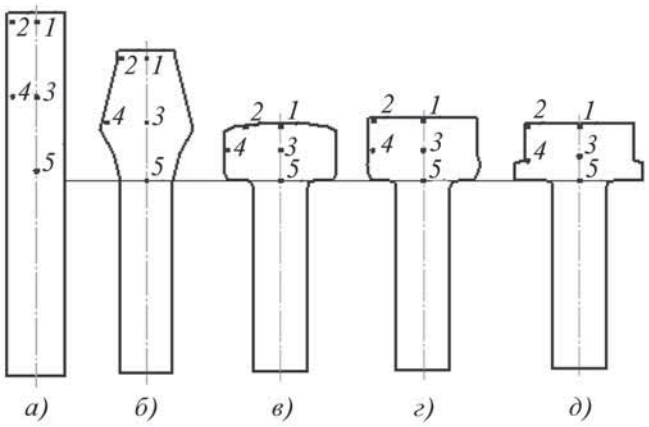


Рис. 1. Положение исследуемых зон шестигранного болта с фланцем на переходах высадки:
а – исходная заготовка; *б* – набор; *в* – осадка; *г* – формовка наружного контура; *д* – окончательная формовка с получением фланца; *1–5* – номера исследуемых зон

Целью работы является разработка методики расчета конечных пластических деформаций металла в объеме заготовок, полученных многопереходными процессами объемной штамповки, на примере холодной высадки шестигранного болта с фланцем из стали 30Г1Р и двенадцатигранной гайки из стали 35В2.

Для достижения поставленной цели было обозначено решение следующих задач:

– определение положения выделенных зон на шлифах переходов для оценки деформированного состояния металла и замера микротвердости;

– расчет компонентов деформированного состояния исследуемых зон в заготовках на переходах высадки болта и гайки на шлифах;

– проведение замеров микротвердости материала в исследуемых зонах высаживаемых заготовок для сравнения полученных результатов с данными, полученными микроструктурным методом.

В высаживаемых изделиях были выбраны характерные зоны:

– для болта (рис. 1): торцевая поверхность (*1*), поверхность контакта с постановочным инструментом (*2*, *4*), внутренняя центральная зона (*3*), переходная поверхность от головки к стержню (*5*);

– для гайки рис. 2: зона под накатку резьбы (*1*, *4*), опорная поверхность (*2*, *3*), внешняя поверхность, контактируемая с постановочным инструментом (*5*, *6*).

Перемещение исследуемых зон в заготовках по переходам высадки для болта и гайки приведены соответственно на рис. 1, *а–д* и рис. 2, *а–д*. В каждой зоне на каждом переходе рассчитаны компоненты деформированного состояния материала и измерена микротвердость с использованием микротвердомера ПМТ-3 с нагрузкой 1000 мН (100 гс) и увеличением ×500 (для отпечатков 76...125 мкм). В каждой зоне проводили по пять наколов, по которым рассчитывали среднее значение.

Значение интенсивности ε_i деформированного состояния металла для каждой зоны по переходам определяли по зависимости

$$\varepsilon_i = \frac{2}{3}\sqrt{\frac{1}{2}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + \frac{1}{2}(\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + \frac{1}{2}(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2},$$

где ε_1, ε_2, ε_3 – главные компоненты деформации:

$$\varepsilon_1 = 0{,}5\ln\left(\frac{\rho_0^2}{\rho_i^2}\right)_{\min}; \quad \varepsilon_2 = 0{,}5\ln\left(\frac{\rho_0^2}{\rho_i^2}\right)_{\max};$$

$$\varepsilon_3 = -(\varepsilon_1 + \varepsilon_2),$$

где ρ, ρ_0 – длины отрезков, пересекающих установленное число деформированных и недеформированных зерен на шлифах заготовок согласно микроструктурному методу Г.А. Смирнова-Аляева.

Характеристику вида деформированного состояния ν_ε (коэффициент В. Лоде) определяли по выражению

$$\nu_\varepsilon = \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}.$$

Значения компонентов деформированного состояния материала выделенных зон по переходам высадки приведены в табл. 1.

Полученные значения вида деформированного состояния ν_ε по переходам высадки болта свидетельствуют о сложном протекании деформации металла, при котором деформации сжатия сменяются деформациями растяжения и наоборот. Только во внутренней центральной зоне *3* и зоне перехода от головки к стержню *5* (см. рис. 1) на всех переходах имеет место деформация сжатия. Результаты замеров микротвердости металла в исследуемых зонах заготовки болта по переходам высадки приведены на рис. 3.

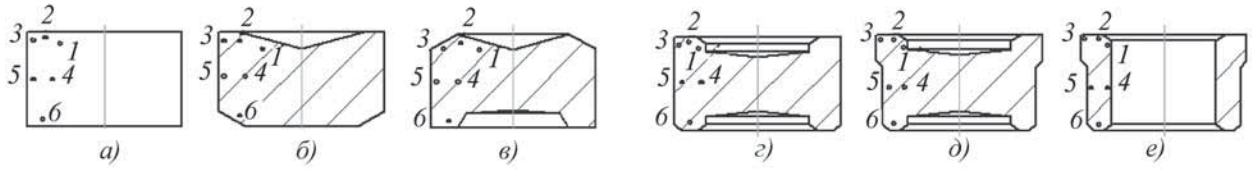


Рис. 2. Положение исследуемых зон двенадцатигранной гайки с фланцем на переходах высадки:
а – исходная заготовка; *б* – 1-я осадка; *в* – 2-я осадка; *г* – 3-я осадка; *д* – формовка наружного двенадцатигранного профиля и бурта; *е* – пробивка отверстия; *1–5* – номера исследуемых зон

1. Компоненты деформируемого состояния материала для шестигранного болта с фланцем из стали 30Г1Р

Номер исследуемой зоны	ε_1	ε_2	ε_3	ε_i	ν_ε
1-й переход					
1	–0,2636	0,0735	0,1900	0,2720	0,486
2	–0,7461	0,2581	0,4880	0,7578	0,627
3	0,2045	0,2271	0,4316	0,4318	0,932
4	0,1024	–0,0564	–0,0460	0,1026	–0,869
5	0,2498	0,3238	–0,5736	0,5752	0,835
2-й переход					
1	0,6748	0,0638	–0,7386	0,8185	0,135
2	0,3627	–0,2395	–0,1232	0,3688	–0,614
3	–0,5838	0,3083	0,2755	0,5841	0,926
4	0,1477	–0,5759	0,4282	0,5982	0,441
5	0,2729	–0,4170	0,1440	0,4235	0,626
3-й переход					
1	–0,9990	–0,0043	1,0033	1,1560	–0,006
2	0,1088	0,0918	–0,2006	0,2008	0,890
3	–0,2118	0,1391	0,0728	0,2153	0,622
4	0,2888	0,4386	–0,7274	0,7326	0,743
5	0,1770	–0,4970	0,3200	0,5038	0,650
4-й переход					
1	–0,4749	0,1648	0,3102	0,4823	0,630
2	–0,1834	0,1754	0,0080	0,2073	0,067
3	0,2060	–0,4862	0,2802	0,4881	0,806
4	–0,2757	0,0757	0,2000	0,2849	0,478
5	0,3591	0,1125	–0,4716	0,4926	0,406

Согласно изложенной выше методике были выполнены расчеты высадки двенадцатигранной гайки, значения компонентов деформированного состояния материала выделенных зон (см. рис. 2) по переходам высадки приведены в табл. 2. В данном случае, как и при высадке фланцевого болта, деформация исследуемых зон на переходах также характеризуется сменой схемы деформаций. Результаты замеров микротвердости металла в исследуемых зонах заготовки двенадцатигранной гайки из стали 35В2 по переходам высадки приведены на рис. 4.

При расчете конечного деформированного состояния материальных точек объема заготовок, полученных многопереходными процессами холодной высадки, были использованы следующие положения:

– конечное (окончательное) формоизменение материальной точки определяется арифметическим суммированием интенсивностей последовательных малых деформаций;

– интенсивность деформированного состояния является скалярной величиной;

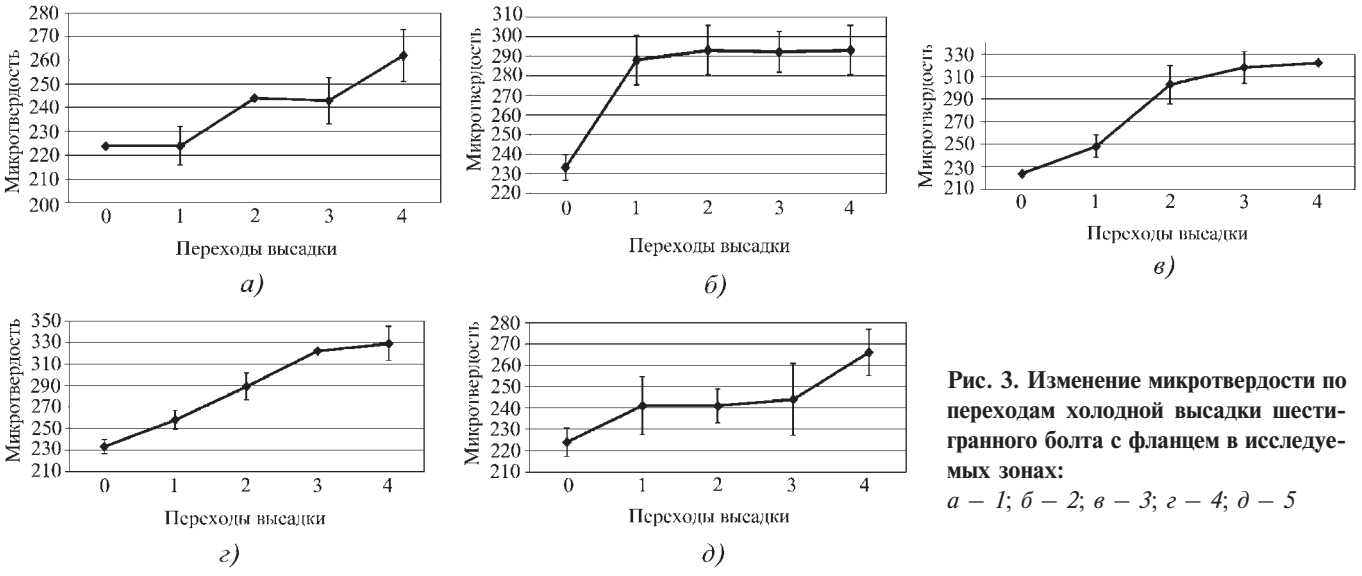


Рис. 3. Изменение микротвердости по переходам холодной высадки шестигранного болта с фланцем в исследуемых зонах:
а – 1; *б – 2*; *в – 3*; *г – 4*; *д – 5*

2. Компоненты деформированного состояния материала для двенадцатигранной гайки из стали 35В2

Номер исследуемой зоны	ε_1	ε_2	ε_3	ε_i	ν_ε	Номер исследуемой зоны	ε_1	ε_2	ε_3	ε_i	ν_ε
1-й переход						*4*	0,397	0,055	–0,452	0,493	0,194
1	0,369	0,548	–0,917	0,922	0,796	*5*	0,266	0,422	–0,688	0,699	0,719
2	–0,183	–0,353	0,536	0,544	–0,618	*6*	0,284	0,327	–0,611	0,611	0,908
3	0,588	0,391	–0,979	0,985	0,749	**4-й переход**					
4	0,555	0,466	–1,021	1,022	0,887	1	–0,425	–0,222	0,647	0,657	–0,621
5	0,586	0,586	–1,172	–1,172	1,000	*2*	0,230	0,312	–0,542	0,544	0,808
6	0,295	0,480	–0,775	0,782	0,705	*3*	0,206	–0,034	–0,172	0,220	–0,270
2-й переход						*4*	–0,353	–0,182	0,173	0,355	0,966
1	–0,257	0,127	0,130	0,257	0,984	*5*	0,418	0,317	–0,735	0,737	0,825
2	0,077	0,340	–0,417	0,443	0,305	*6*	0,318	–0,200	–0,298	–0,336	–0,097
3	0,284	–0,157	–0,127	0,284	–0,864	**5-й переход**					
4	–0,415	–0,114	0,529	0,556	–0,362	*1*	0,145	0,0474	–0,619	0,647	0,398
5	–0,312	0,012	0,300	0,353	0,059	*2*	–0,082	0,277	–0,195	0,284	–0,521
6	0,138	–0,396	0,258	0,402	0,633	*3*	–0,280	–0,060	0,340	0,362	–0,290
3-й переход						*4*	0,323	0,327	–0,650	0,650	0,992
1	0,275	0063	–0,298	0,331	0,120	*5*	0,318	–0,415	0,097	0,434	0,397
2	0,167	–0,348	0,181	0,348	0,947	*6*	–0,461	0,168	0,293	0,488	0,668
3	0,272	0,416	0,688	0,693	0,739						

– интенсивность деформированного состояния материальной точки при микроструктурном методе определяется на основании ее сравнения с деформированным состоянием в предыдущий момент, в частности в конце каждого перехода высадки;

– между значениями твердости и напряжением имеется корреляция.

Для болта и гайки были построены зависимости напряжение–степень деформации (рис. 5 и 6).

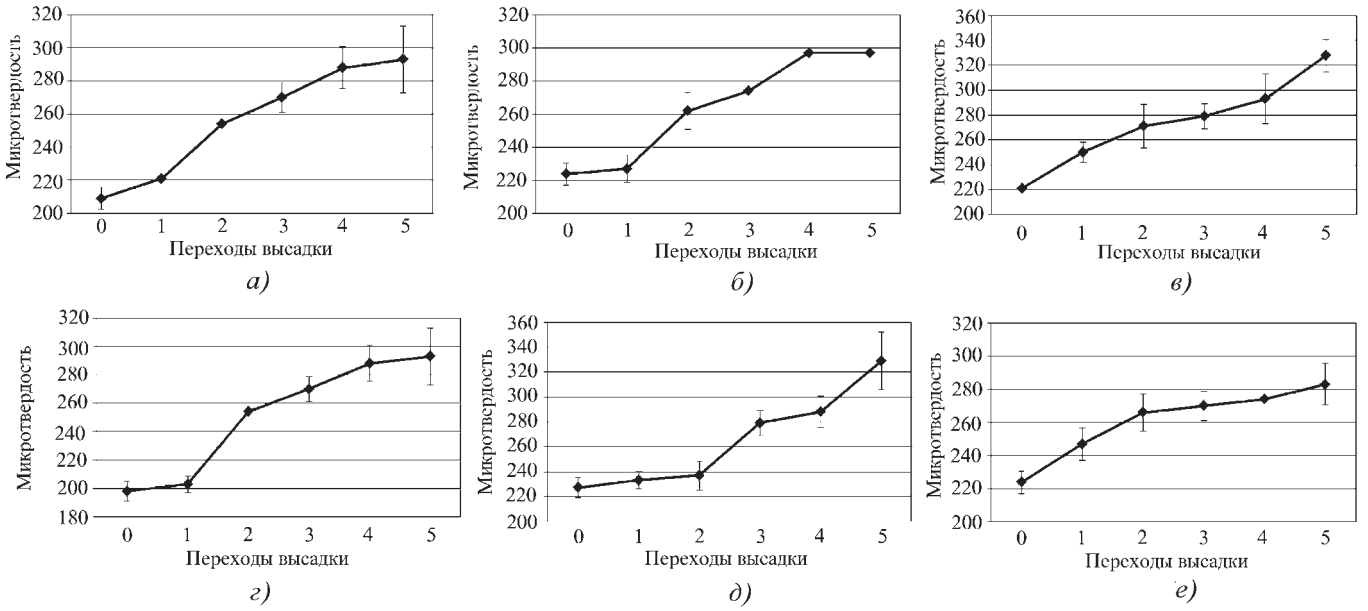


Рис. 4. Изменение микротвердости по переходам холодной высадки двенадцатигранной гайки с фланцем в исследуемых зонах: *а – 1*; *б – 2*; *в – 3*; *г – 4*; *д – 5*

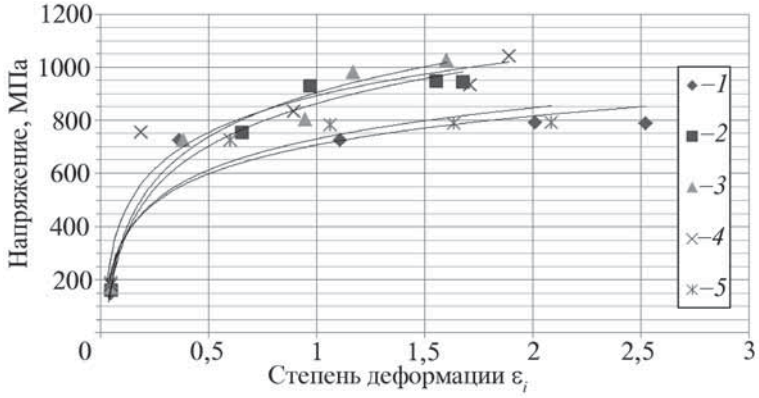


Рис. 5. Зависимости напряжения от степени деформации в исследуемых зонах высаживаемой заготовки шестигранного болта с фланцем из стали 30Г1Р:
1–5 – номера исследуемых зон

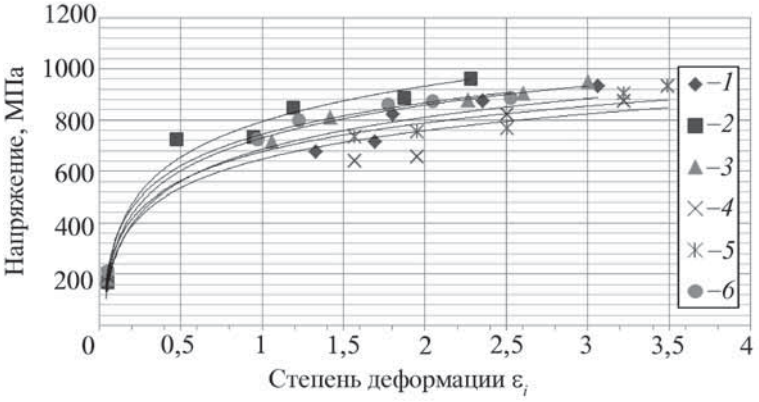


Рис. 6. Зависимости напряжения от степени деформации в исследуемых зонах высаживаемой заготовки двенадцатигранной гайки из стали 35В2:
1–6 – номера исследуемых зон

Учитывая, что интенсивность деформированного состояния является скалярной величиной и конечное формоизменение материальной точки определяется арифметическим суммированием интенсивностей последовательных малых деформаций, по горизонтальной оси были отложены значения интенсивностей деформированного состояния металла по переходам с учетом их арифметического суммирования. По вертикальной оси были отложены напряжения с учетом соотношения между временным сопротивлением при растяжении и твердостью материала по Г. Делю.

Построенные зависимости показали сопоставимость с кривыми упрочнения, полученными при испытаниях тех же металлов на растяжение и сжатие, так как располагаются между ними. В частности, при высадке болта кривые *3* и *5* располагаются ниже кривых *1*, *2* и *4*, так как в них преобладает схема сжатия. Степень деформации в точках *3* и *5* на последнем переходе достигла значения, большего, чем при стандартных испытаниях на сжатие. Это объясняется тем, что указанные точки располагаются в объеме заготовки и повышение их пластичности обеспечивается гидростатическим давлением. При высадке гайки кривые упрочнения практически не расходятся. Это объясняется бóльшим совпадением схем деформации исследуемых зон по переходам высадки, чем в случае высадки болта.

Полученные зависимости совпадают с мнением Г.А. Смирнова-Аляева о том, что "степень деформации и интенсивность деформации могут быть представлены как фактически пройденный путь по пересеченной местности, соединяющий два отдаленных пункта: с кратчайшим расстоянием и с различными отхождениями от него".

Выводы

1. Деформированное состояние исследуемых зон высаживаемых изделий (болта и гайки) в многопереходных процессах холодной высадки согласно коэффициенту В. Лоде характеризуется сменой схемы деформации, при которой сжатие сменяется растяжением и наоборот.

2. Во всех исследуемых зонах высаживаемых заготовок изделий независимо от схемы деформации на переходах и их комбинации прочностные характеристики металла постоянно увеличиваются.

3. Конечное значение деформированного состояния исследуемых зон высаживаемых изделий можно определить арифметическим суммированием скалярных значений интенсивностей деформаций на каждом из переходов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Галкин В.В., Кудрявцев С.А., Терещенко Е.Г.** Развитие микроструктурного метода исследования конечных пластических деформаций // Заготовительные производства в машиностроении. 2010. № 2. С. 22–24.

Владимир Викторович Галкин, канд. техн. наук, lumi1950@mail.ru;
Сергей Александрович Кудрявцев, канд. техн. наук;
Елена Григорьевна Терещенко;
Андрей Анатольевич Дербенев

УДК 621.735

С.Е. Александров *(Институт проблем механики РАН),*
А.Р. Пирумов *(Московский государственный университет приборостроения и информатики)*

Расчет процессов обработки металлов давлением вязкопластических материалов методом верхней оценки*

Выполнен сравнительный анализ приложений теоремы о верхней оценке к процессам обработки металлов давлением для идеально жесткопластических материалов, вязких жидкостей и вязких твердых тел. Особенности применения теоремы для вязкопластических материалов рассмотрены на примере осадки полого цилиндра между плоскими плитами. Показано, что в случае вязких твердых тел нельзя получить верхнюю оценку силы, необходимой для деформирования цилиндра. Предложен метод определения приближенного значения силы с использованием верхне-граничного решения.

Ключевые слова: обработка металлов давлением; жесткопластический материал; вязкопластический материал.

The comparative study on application of the upper bound theorem to metal forming processes for rigid perfectly plastic materials, viscous liquids and viscous solids is presented. Distinguished features of the theorem for viscoplastic materials are considered by means of upsetting of hollow cylinder between flat platens. It is shown that it is impossible to find upper bound on the force required to deform the cylinder made of viscous solids. The method to determine of approximate magnitude of this force with the use of the upper bound solution is proposed.

Keywords: metal forming processes; rigid plastic material; viscoplastic material.

Метод верхней оценки широко применяют для определения приближенных значений параметров процессов обработки металлов давлением. Метод позволяет получать относительно простые аналитические и полуаналитические решения [1], а также может быть использован совместно с методом конечных элементов [2].

При применении метода в прикладных расчетах математическая задача сводится к минимизации некоторого функционала или при дальнейших предположениях относительно кинематически возможного поля скоростей к минимизации функции одной или нескольких переменных. В простейшем случае необходимо выполнить интегрирование для вычисления оценки требуемой величины.

Наиболее часто метод верхней оценки применяют, предполагая, что материал подчиняется модели идеального жесткопластического материала [1, 2]. В этом случае функционал J_p, который должен быть минимизирован, имеет вид

$$J_p = \int_V \tau_{ij}\,\zeta_{ij}\,dV + \int_{S_\Delta} k|[\nu_\tau]|\,dS - \\ - \int_{S_p+S_{pu}} p_{ni}\,\nu_i\,dS \ge \int_{S_u+S_{pu}} t_{ni}\,u_i\,dS\ , \qquad (1)$$

где ν_i – компоненты вектора, определяющего кинематически возможное поле скорости ν; ζ_{ij} – компоненты тензора скорости деформации, вычисленные по ν_i; $[\nu_\tau]$ – скачок компоненты скорости, касательной к поверхности разрыва скорости S_Δ (вычисляется по кинематически возможному полю скорости); u_i – компоненты вектора, определяющего действительное поле скорости u; t_{ni} – компоненты действительного вектора напряжения на площадке с нормалью n; V – объем материала; S_p – поверхность, на которой заданы все компоненты вектора напряжения p_{ni} (т.е. $t_{ni} = p_{ni}$ на этой поверхности); S_u – поверхность, на которой заданы все компоненты вектора скорости (т.е. $u_i = \nu_i$ на этой поверхности); S_{pu} – поверхность, на которой заданы некоторые компоненты вектора напряжения и некоторые компоненты вектора скорости; τ_{ij} – компоненты тензора-девиатора напряжения, вычисляемые по кинематически возможному полю скорости с помощью ассоциированного закона течения; k – предел текучести при чистом сдвиге (k = const для идеально пластического материала).

В левой части (1) при интегрировании по S_{pu} учитываются только слагаемые в подинтегральном выражении, содержащие заданные компоненты вектора напряжения, а в правой части – только слагаемые, содержащие заданные компоненты вектора скорости. Таким образом, компоненты t_{ni} в правой части неравенства (1) являются действительными компонентами тензора напряжения, но неизвестными.

Вид функционала, следующего из теоремы о верхней оценки, зависит от определяющих уравнений, полученных Р. Хиллом. Однако во многих случаях ошибочно используют функционал (1) для вязкопластиче-

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ-11-08-91154-ГФЕН_а и Госконтракта № 11.519.11.3015.

ских материалов [3–6]. Правильный функционал для таких материалов выведен в работе П.П. Мосолова, В.П. Мясникова (Вариационные методы в теории течений жестко-вязко-пластических сред. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1971. 114 с.). В частности, если материал подчиняется условию текучести вида $\sigma_{eq} = \sigma_Y(\xi_{eq})$, где σ_{eq} – второй инвариант тензора напряжения $\sigma_{eq} = \sqrt{3/2}\,(\tau_{ij}\,\tau_{ij})^{1/2}$, а $\sigma_Y(\xi_{eq})$ – достаточно произвольная функция эквивалентной скорости деформации ξ_{eq}, и ассоциированному закону течения, то функционал имеет вид

$$\int_V E(\zeta_{eq})\,dV - \int_{S_p+S_{pu}} F \vee dS \ge \int_V E(\xi_{eq})\,dV - \int_{S_p+S_{pu}} Fu\,dS\ , \quad (2)$$

где

$$E(\xi_{eq}) = \int \sigma_Y(\xi_{eq})\,d\xi_{eq}\,, \quad E(\zeta_{eq}) = \int \sigma_Y(\zeta_{eq})\,d\zeta_{eq}\,,$$
$$\xi_{eq} = \sqrt{\frac{2}{3}}\,(\xi_{ij}\,\xi_{ij})^{1/2}, \qquad \zeta_{eq} = \sqrt{\frac{2}{3}}\,(\zeta_{ij}\,\zeta_{ij})^{1/2}. \quad (3)$$

В (2) по сравнению с (1) отсутствует интеграл по поверхностям разрыва скорости. Это связано с тем, что такие разрывы невозможны в вязкопластических материалах. За исключением этого отличия (2) сводится к (1) при $\sigma_Y = \text{const}$. Отметим, что физический смысл величины σ_Y – предел текучести при одноосном растяжении и $\sigma_Y = \sqrt{3}\,k$ при выбранном условии текучести.

Вязкопластические материалы обычно разделяют на два класса: вязкие жидкости и вязкие твердые тела. Вязкие жидкости характеризуются условием $\sigma_Y \to 0$ при $\xi_{eq} \to 0$, а вязкие твердые тела – условием $\sigma_Y \to \sigma_0 > 0$ при $\xi_{eq} \to 0$. Для вязких жидкостей функционал (2) использован в [7–9].

Если $\sigma_Y = A\,\xi_{eq}^n$, то из верхнеграничного решения в некоторых случаях можно оценить силу, необходимую для деформирования материала [7, 9]. В общем случае это не так для вязкопластических материалов, как будет показано ниже. Для вязких твердых тел функционал (2) для расчета процессов обработки металлов давлением, видимо, не применяли.

Существенную трудность при применении функционала (2) для процессов обработки металлов давлением вызывает учет сил трения. Если реализуется режим проскальзывания, то удельные силы трения входят в поверхностный интеграл в левой части неравенства (2) и в соответствии с требованиями теоремы это должны быть действительные напряжения. В большинстве случаев значения этих напряжений неизвестны из краевых условий.

Например, при применении закона трения Кулона задано отношение между удельными силами трения и нормальным напряжением. Б.А. Друяновым было показано, что этот закон трения несовместим даже с функционалом (1) для идеально жесткопластического материала. Для таких материалов при использовании метода верхней оценки обычно выбирают закон трения Прандтля, согласно которому при проскальзывании

$$\tau_f = mk\,, \quad 0 \le m \le 1\,, \quad (4)$$

где τ_f – удельные силы трения.

Так как $k = \text{const}$ для идеально жесткопластических материалов, то (4) дает некоторое фиксированное значение τ_f, определяющее одну из компонент p_{ni}, которая выносится за знак интеграла в (1). Закон трения в виде (4) применяют и для вязкопластических материалов. В этом случае k зависит от эквивалентной скорости деформации. Поэтому действительное значение k, а значит и τ_f, можно найти только если известно действительное поле скоростей.

Поскольку действительное поле скорости является основным результатом решения поставленной задачи, то очевидно, что требуемое значение τ_f неизвестно в процессе решения задачи. Однако, если $m = 1$ в (4), то выполняется закон максимального трения. Известно, что в этом случае режим проскальзывания невозможен ни для вязких жидкостей [10], ни для вязких твердых тел [11]. Исключение составляют материалы, подчиняющиеся условию текучести с напряжением насыщения [12]. Такие материалы не рассмотрены. Тогда на поверхности трения заданы все компоненты вектора скорости (поверхность S_u) и никаких противоречий с функционалом (2) не возникает. Именно на этом математическом свойстве решений основан подход, предложенный и реализованный в [7, 9] для вязких жидкостей. Обобщим этот подход на вязкие твердые тела.

Примем условие текучести в виде

$$\sigma_{eq} = \sigma_Y = \sigma_0\,(1 + \xi_{eq}/\xi_0)\,, \ \sigma_0 = \text{constant}\,, \quad \xi_0 = \text{constant}\,. \quad (5)$$

Подставляя (5) в (3), найдем

$$E(\xi_{eq}) = \sigma_0\left(\xi_{eq} + \frac{\xi_{eq}^2}{2\,\xi_0}\right), \qquad E(\zeta_{eq}) = \sigma_0\left(\zeta_{eq} + \frac{\zeta_{eq}^2}{2\,\xi_0}\right). \quad (6)$$

Пластическую мощность определяем с помощью (5) в форме

$$w = \sigma_0\left(\xi_{eq} + \frac{\xi_{eq}^2}{\xi_0}\right). \quad (7)$$

Рассмотрим осадку полого цилиндра между параллельными плитами в цилиндрической системе координат $r\,\theta\,z$, ось z которой совпадает с осью симметрии цилиндра (рис. 1). Решение не зависит от θ. Плоскость $z = 0$ является плоскостью симметрии процесса. Поэтому достаточно получить решение в области $z \ge 0$. Поверхность S_p состоит из поверхностей $r = R$ и

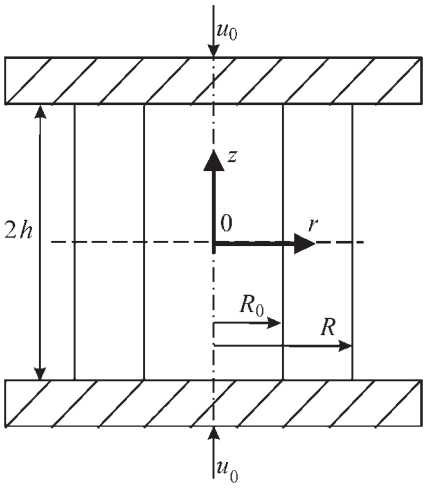


Рис. 1. Схема процесса осадки полого цилиндра

$r = R_0$, свободных от напряжений. На поверхности $z = h$ задан закон максимального трения, поэтому, как было отмечено ранее, эта поверхность является поверхностью S_u. Поверхность $z = 0$ является поверхностью S_{pu}. На ней заданы напряжение $\tau_{rz} = 0$ и скорость $u_z = 0$. Здесь R – внешний радиус цилиндра, R_0 – внутренний радиус цилиндра и h – половина высоты цилиндра.

Таким образом, теорема о верхней оценке в форме (2) имеет силу для заданных граничных условий и функционал (2) упрощается к виду

$$\int_V E(\zeta_{eq})\,dV \geq \int_V E(\xi_{eq})\,dV\,. \qquad (8)$$

Кинематически возможное поле скорости должно удовлетворять условию несжимаемости, а также граничным условиям $u_z = 0$ при $z = 0$ и $u_z = -u_0$ при $z = h$. Одно из простейших полей скорости имеет вид

$$\begin{aligned}
&\frac{v_z}{u_0} = -(1+\alpha)\sin\left(\frac{\pi}{2}\frac{z}{h}\right) - \alpha\sin\left(\frac{3\pi}{2}\frac{z}{h}\right);\\
&\frac{v_r}{u_0} = \frac{\pi}{4}\frac{r}{h}\left(1-\frac{r_n^2}{r^2}\right)\times\\
&\times\left[(1+\alpha)\cos\left(\frac{\pi}{2}\frac{z}{h}\right) + 3\alpha\cos\left(\frac{3\pi}{2}\frac{z}{h}\right)\right].
\end{aligned} \qquad (9)$$

Вычислениями подтверждено, что это поле скорости удовлетворяет всем требованиям при любых значениях α и r_n. Физический смысл величины r_n состоит в том, что материал течет к оси симметрии в области $r < r_n$ и от оси симметрии в области $r > r_n$, если $R > r_n > R_0$. Удобно ввести следующие безразмерные величины:

$$\begin{aligned}
&\zeta = \frac{z}{h};\ \rho = \frac{r}{R};\ s = \frac{h}{R};\ \rho_0 = \frac{R_0}{R};\\
&\rho_n = \frac{r_n}{R};\ \varepsilon_{ij} = \frac{h\zeta_{ij}}{u_0};\ \varepsilon_{eq} = \frac{h\zeta_{eq}}{u_0};\ \beta = \frac{u_0}{2h\xi_0}.
\end{aligned} \qquad (10)$$

Используя (9) и (10), безразмерные компоненты тензора скорости деформации и безразмерную эквивалентную скорость деформации определяем по формулам:

$$\begin{aligned}
&\varepsilon_{zz} = -\frac{\pi}{2}\left[(1+\alpha)\cos\left(\frac{\pi}{2}\varsigma\right) + 3\alpha\cos\left(\frac{3\pi}{2}\varsigma\right)\right];\\
&\varepsilon_{\theta\theta} = \frac{\pi}{4}\left(1-\frac{\rho_n^2}{\rho^2}\right)\left[(1+\alpha)\cos\left(\frac{\pi}{2}\varsigma\right) + 3\alpha\cos\left(\frac{3\pi}{2}\varsigma\right)\right];\\
&\varepsilon_{rr} = -\varepsilon_{\theta\theta} - \varepsilon_{zz};\\
&\varepsilon_{rz} = -\frac{\pi^2}{16}\frac{\rho}{s}\left(1-\frac{\rho_n^2}{\rho^2}\right)\left[(1+\alpha)\sin\left(\frac{\pi}{2}\varsigma\right) + 9\alpha\sin\left(\frac{3\pi}{2}\varsigma\right)\right];\\
&\varepsilon_{eq} = \frac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{\varepsilon_{zz}^2 + \varepsilon_{\theta\theta}^2 + \varepsilon_{zz}\,\varepsilon_{\theta\theta} + \varepsilon_{rz}^2}\,.
\end{aligned} \qquad (11)$$

Учитывая (6) и (10), неравенство (8) может быть представлено в форме

$$\int_0^1\int_{\rho_0}^1 (\varepsilon_{eq} + \beta\,\varepsilon_{eq}^2)\,\rho\,d\,\rho\,d\,\zeta \to \min\,. \qquad (12)$$

Подстановка (11) в (12) приводит к функции двух переменных α и ρ_n, которая должна быть минимизирована по этим переменным численно. Численное решение иллюстрируется на рис. 2, 3, на которых показаны зависимости α и ρ_n от s для нескольких значений β и ρ_0.

Полученное решение не позволяет получить верхнюю оценку силы, требуемой для деформирования цилиндра. В этом заключается значительное отличие от функционала (1) для идеально-жесткопластического материала и для класса задач с использованием функционала (2) для вязких жидкостей [7, 9]. Приближенное значение силы деформирования можно получить, приравнивая мощность внутренних и внешних сил. Такой метод был применен в [13] для анализа процесса деформирования кусочно-однородных материалов. Из принятых граничных условий и (7) получаем

$$2\pi\sigma_0\int_0^h\int_{R_0}^R (1 + \xi_{eq}/\xi_0)\,\xi_{eq}\,r\,dr\,dz = Fu_0\,, \qquad (13)$$

где F – сила, приложенная к каждой плите (см. рис. 1). Заменяя ξ_{eq} в (13) приближенным значением, вычисляемым по полю скорости (9) при найденных значениях α и ρ_n, получаем приближенное значение F. Учитывая (10), уравнение (13) преобразовывается к виду

$$f_a = \frac{F}{\pi R^2\,\sigma_0} = 2\int_0^1\int_{\rho_0}^1 (\varepsilon_{eq} + 2\beta\varepsilon_{eq}^2)\,\rho\,d\,\rho\,d\,\zeta\,, \qquad (14)$$

где f_a – приближенное значение безразмерной силы, приложенной к каждой плите. Зависимость этой силы

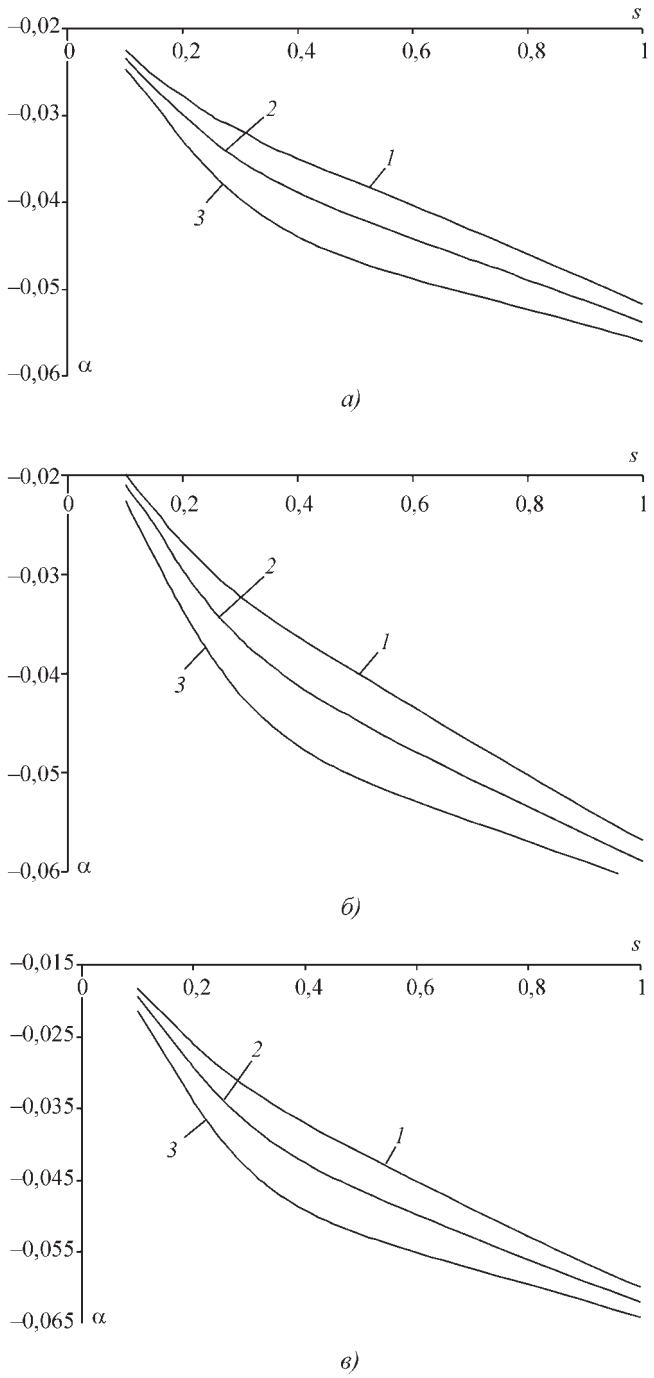


Рис. 2. Зависимость параметра α от *s* при различных значениях β и ρ_0:
а – β = 0,5; *б* – β = 1; *в* – β = 2; *1* – ρ_0 = 0,3; *2* – ρ_0 = 0,4; *3* – ρ_0 = 0,5

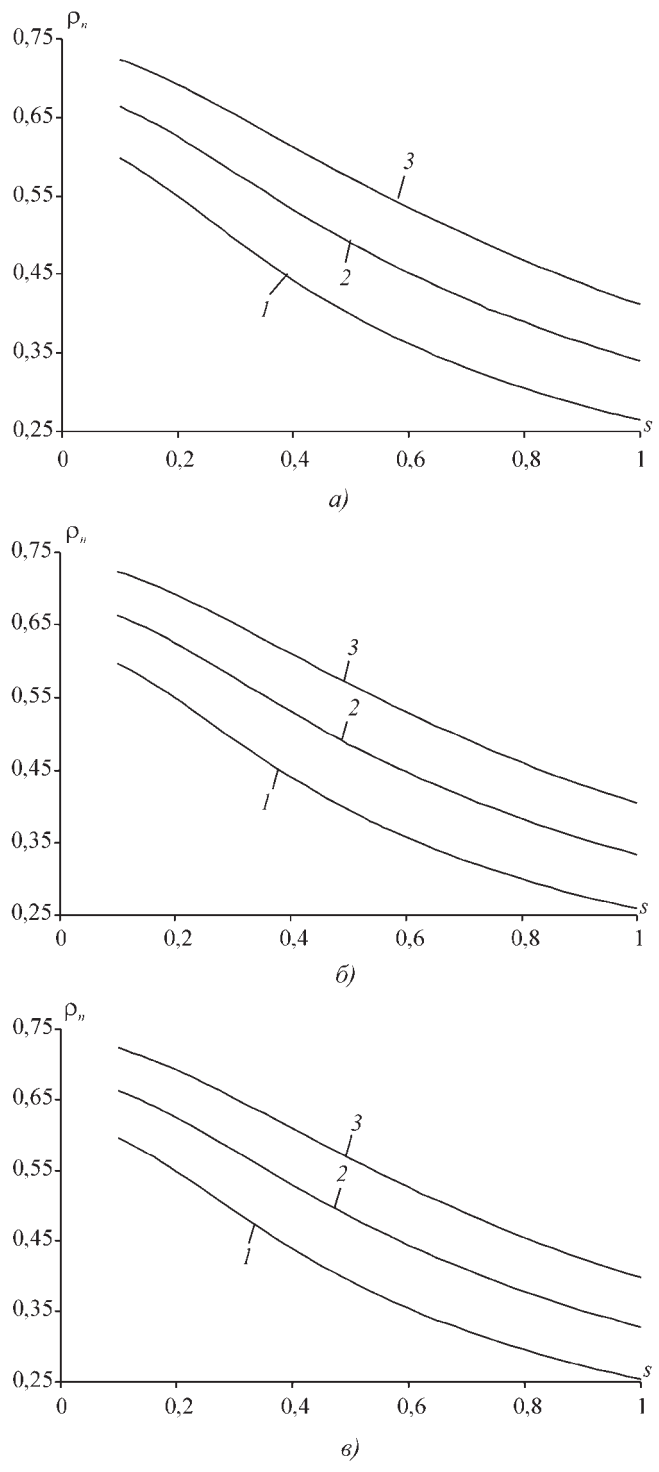


Рис. 3. Зависимость параметра ρ_n от *s* при различных значениях β и ρ_0:
а – β = 0,5; *б* – β = 1; *в* – β = 2; *1* – ρ_0 = 0,3; *2* – ρ_0 = 0,4; *3* – ρ_0 = 0,5

от *s* для нескольких значений β и ρ_0 показана на рис. 4.

Верхне-граничные решения для рассматриваемого процесса были получены с использованием модели идеально-жесткопластического материала в [1] и модели вязкого материала в [7]. Модель материала, принятая в данной статье, и модель, использованная в [7], сводятся к модели идеально-жесткопластического ма-

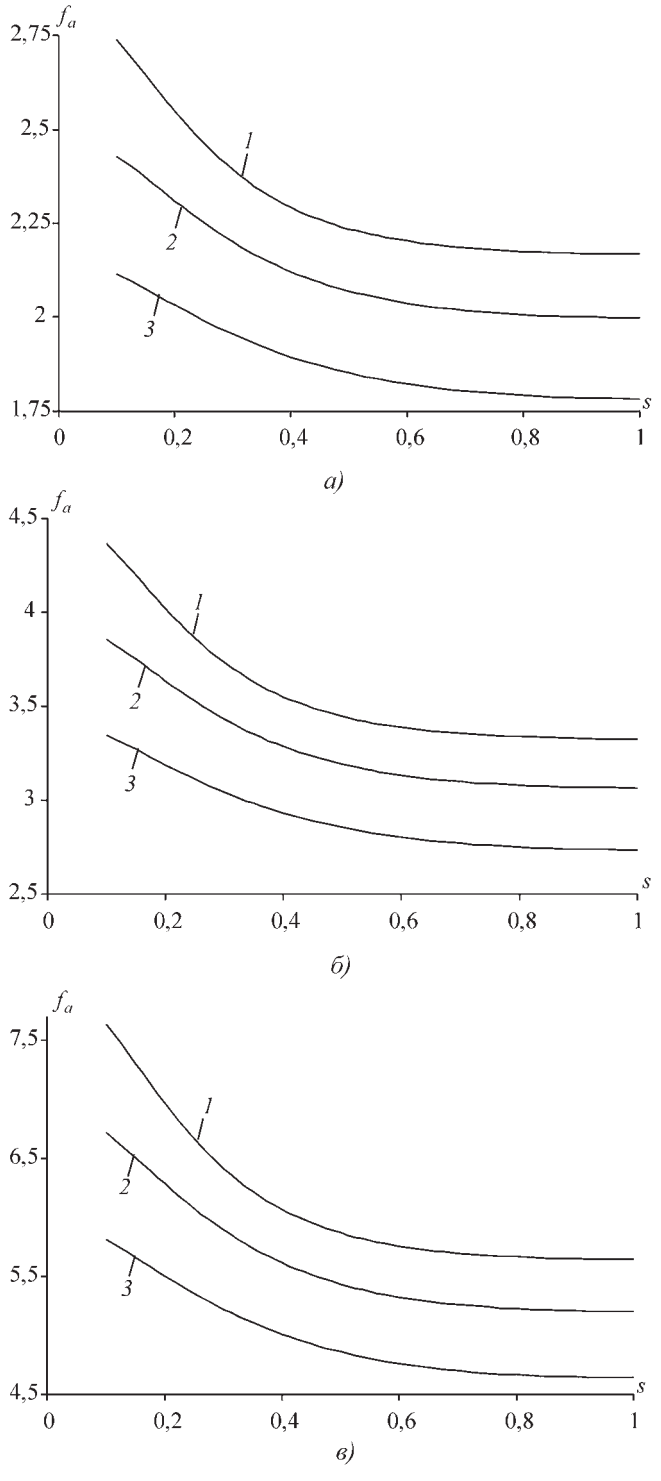


Рис. 4. Зависимость безразмерной силы f_a от s при различных значениях β и ρ_0:
а – β = 0,5; *б* – β = 1; *в* – β = 2; *1* – ρ_0 = 0,3; *2* – ρ_0 = 0,4; *3* – ρ_0 = 0,5

териала при определенных предельных значениях параметров моделей.

Решения конкретных краевых задач, включающих в себя закон максимального трения в качестве одного из краевых условий, полученные по моделям, учитывающим вязкость материала, не сходятся к соответствующим идеально-жесткопластическим решениям независимо от того, насколько близки параметры моделей, учитывающих вязкость материала, к отмеченным предельным значениям. Это математическое свойство решений существенно влияет на технику применения теоремы о верхней оценке.

Как правило, структура кинематически возможного поля скорости для модели идеально-жесткопластического материала намного проще, чем для моделей, учитывающих вязкость материала. В случае рассмотренного процесса это видно из сравнения поля скоростей (9), которое является одним из простейших кинематически возможных полей скорости, и поля скоростей, использованного в [1].

Причина такого значительного качественного различия состоит в том, что в случае идеально-жесткопластического материала возможны разрывы скорости и режим проскальзывания на поверхности трения. По этой же причине конечно-элементные программы, основанные на теореме о верхней оценке и разработанные для идеально-жесткопластического материала (например, [2]), не могут быть использованы для вязкопластических материалов. Структуры кинематически возможных полей скорости для вязких жидкостей и вязких твердых тел подобны. В случае рассмотренного процесса это видно из сравнения поля скоростей (9) и поля скоростей, использованного в [7]. Однако значительное различие между этими моделями состоит в том, что верхняя оценка нагруки может быть получена для класса краевых задач только при использовании вязкой модели, но не вязкого твердого тела.

Выводы

1. Решения краевых задач по моделям, учитывающим вязкость материала и включающих в себя закон максимального трения в качестве одного из краевых условий, не сходятся к соответствующим идеально-жесткопластическим решениям.

2. Конечно-элементные программы, основанные на теореме о верхней оценке и разработанные для идеально-жесткопластического материала, не могут быть напрямую использованы для вязкопластических материалов.

3. Верхняя оценка нагрузки может быть получена для класса краевых задач только при использовании вязкой модели, но не вязкого твердого тела.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Avitzur B.** Metal Forming: The Application of Limit Analysis. New York and Basel: Marcel Dekker, 1980. 208 p.

2. **Bramley A.N.** UBET and TEUBA: fast methods for forging simulation and perform design // J. Mater. Process. Technol. 2001. V. 116. P. 62–66.

3. **Sahi M., Rahouadj R., Herbach R., Choulier D.** The influence of viscoplasticity in the interpretation of the ring test // J. Mater. Process. Technol. 1996. V. 58. P. 286–292.

4. **Serajzadeh S., Mirbagheri S.M.H., Taheri A.K., Zebarjad, S.M.** Modelling of metal flow during hot forging with regard to microstructural aspects // Int. J. Mash. Tools Manufact. 2004. V. 44. P. 1537–1545.

5. **Moller J., Tran L., Shrader D., Douglas J.R., Kuhlman G.W.** Augmented upper bound element technique for prediction of temperature and strain in forgings // J. Mater. Process. Technol. 2004. V. 152. P. 162–175.

6. **Malpani M., Kumar S.** A feature based analysis of tube extrusion // J. Mater. Process. Technol. 2007. V. 190. P. 363–374.

7. **Alexandrov S.** An analysis of the axisymmetric compression of viscous materials // J. Mater. Process. Technol. 2000. V. 105. P. 278–283.

8. **Leu S.-Y.** Limit analysis of viscoplastic flows using an extended general algorithm sequentially: convergence analysis and validation // Comp. Mech. 2003. V. 30. P. 421–427.

9. **Tzou G.-Y., Alexandrov S.** An upper bound solution for a solid viscous cylinder subject to compression and twist // J. Mater. Process. Technol. 2006. V. 177. P. 159–162.

10. **Александров С.Е., Данилов В.Л., Чиканова Н.Н.** О зоне торможения при моделировании осесимметричных процессов обработки металлов давлением в условиях ползучести // Изв. РАН МТТ. 2000. № 1. С. 149–151.

11. **Alexandrov S., Alexandrova N.** On the maximum friction law in viscoplasticity // Mech. Time Depend. Mater. 2000. V. 4. P. 99–104.

12. **Alexandrov S., Mishuris G.** Qualitative behaviour of viscoplastic solutions in the vicinity of maximum-friction surfaces // J. Engng Math. 2009. V. 65. № 2. P. 143–156.

13. **Александров С.Е., Гольдштейн Р.В.** Некоторые особенности применения теоремы о верхней оценке для вязких материалов // Изв. РАН МТТ. 2005. № 6. С. 56–63.

Сергей Евгеньевич Александров, д-р физ.-мат. наук;
Александр Ремальевич Пирумов, канд. техн. наук,
alpirumov@mail.ru

УДК 621.735.32:621.882

В.В. Галкин, А.И. Поздышев, В.А. Поздышев *(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева),*
А.В. Вашурин *(ОАО "Нижегородский авиастроительный завод "Сокол")*

Изготовление толстолистовой оболочки защитного шлема из высокопрочных алюминиевого и титанового сплавов методом глубокой горячей вытяжки

Проведены опытные работы по изготовлению оболочки защитного шлема толщиной 4 мм в натурную величину из бронетанкового алюминия (БТА) и титанового сплава ВТ14 методом глубокой горячей вытяжки. Определена предельная степень вытяжки цельноштампованных эллиптических днищ из труднодеформированных сплавов БТА и ВТ14 при условии создания пластичного состояния металла во фланцевой зоне штампуемой заготовки.

Ключевые слова: листовая штамповка; толстолистовые заготовки; эллиптические днища; высокопрочные алюминиевые и титановые сплавы; условия глубокой горячей вытяжки.

Development works for fabrication of crash helmet shel with thickness 4 mm made of tank armor aluminum and titanium alloy VT14 by deep hot drawing are performed. Limiting drawing rate for seamless ellipsoidal heads made of difficult-to-form tank armor aluminum and titanium VT14 alloys subject to plastic condition of metal in the flange area of the formed blank is determined.

Keywords: plate forming; plate blanks; ellipsoidal heads; high-strength aluminum and titanium alloys; conditions of deep hot drawing.

Проблема изготовления оболочки защитного шлема для бойцов МВД и спецподразделений очевидна и имеет актуальность, в частности если она изготовлена из титана. В настоящее время титановую оболочку, как часть комбинированного шлема, изготовляют из тонколистового титанового сплава толщиной 1,5 мм, хотя первоначально согласно проекту "Алтын" в 1980-е гг. титановая оболочка имела толщину 4 мм и была успешно испытана в условиях военных действий в Афганистане и Чечне.

Изготовляемое изделие можно отнести к толстолистовым, так как ее толщина больше 4 мм. Электронная трехмерная модель изделия, выполненная с использованием программы Unigrafic, приведена на рис. 1.

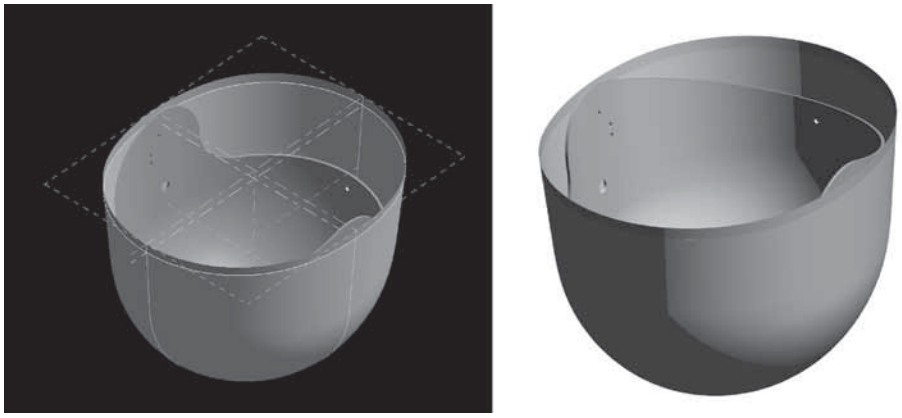


Рис. 1. Электронная трехмерная модель оболочки защитного шлема

Согласно классификации крупногабаритных толстолистовых полых изделий по геометрии (ГОСТ 6533–78) [1] наиболее близкой по конфигурации к изделию является группа I цельноштампованных эллиптических днищ. Однако для них максимальное отношение высоты бурта к среднему диаметру изделия не превышает 0,1, для исследуемого изделия это отношение равно 1, что значительно больше указанного значения. Очевидно в данном случае оболочку защитного шлема изготовляли методом глубокой вытяжки.

Операция вытяжки по определению технологии листовой штамповки представляет собой свертку круглой плоской заготовки в цилиндрический стакан в условиях нестационарного процесса. Согласно модели процесса по В. Бэкофену [2], с учетом пренебрежения изгиба заготовки вытяжка – это процесс выдавливания сектора заготовки через плоскую матрицу, функцию которой выполняют соседние секторы заготовки.

Несмотря на то что вытяжка является одной из основных формообразующих операций листового материала, в научно-технической литературе отсутствуют данные по значению коэффициента предельной вытяжки толстолистовых заготовок, определяемого как отношение диаметра плоской заготовки к среднему диаметру вытянутого изделия, для полых изделий с эллиптическим днищем из трудно деформируемых сплавов, в частности высокопрочных алюминиевых и титановых сплавов. По мнению В. Бэкофена, предельная степень вытяжки не зависит от механических свойств и упрочнения материала в процессе вытяжки и в производстве применяют "практическое правило: из пластичного листового металла можно вытянуть цилиндрический колпачок при диаметре заготовки, не более чем в 2 раза превосходящим диаметр колпачка". Однако в данном случае изделие имеет не плоское дно, а сложную форму. Для пяти стадий процесса вытяжки по В.Е. Недорезову [1] добавляется дополнительная начальная стадия формовки днища под пуансоном за счет растяжения материала.

В 1990-е гг. авторами статьи было успешно освоено опытное производство изделий типа "баллон" из листовых заготовок титановых сплавов ОТ4-1 и ВТ6 толщиной 1,5 мм (рис. 2). Была отработана технология их изготовления, включая в себя конструкцию штамповой оснастки, режимы и методы нагрева заготовки [3, 4]. При этом использовали данные предельной пластичности штампуемых титановых сплавов в условиях горячей обработки в интервале температур 400...850 °С и скоростей деформации $\dot{\varepsilon} = 3{,}4\cdot10^{-3}...4{,}5\cdot10^{-2}$ с$^{-1}$, полученные при стандартном одноосном растяжении и двухосном растяжении методом выпучивания мембран.

На рис. 3 приведены температурные зависимости предельной пластичности $\varepsilon^{пред}$ сплава ОТ4-1. Показатели предельной вытяжки тонколистовых титановых сплавов подтвердили мнение В. Бэкофена о том, что их значение не превышает 2.

Исходя из приведенного выше, в данной работе была поставлена задача проведения опытных работ по получению оболочки защитного шлема толщиной 4 мм в натурную величину из бронетанкового алюминия БТА и титанового сплава ВТ14 методом глубокой горячей вытяжки.

Были выполнены следующие целевые задачи:

– конструирование и изготовление опытного вытяжного штампа;

– проведение опытной штамповки и проверка правильности положения В. Бэкофена о том, что предельная степень вытяжки трудно деформированных алюминиевых и титановых сплавов при условии создания пластичного состояния металла во фланцевой

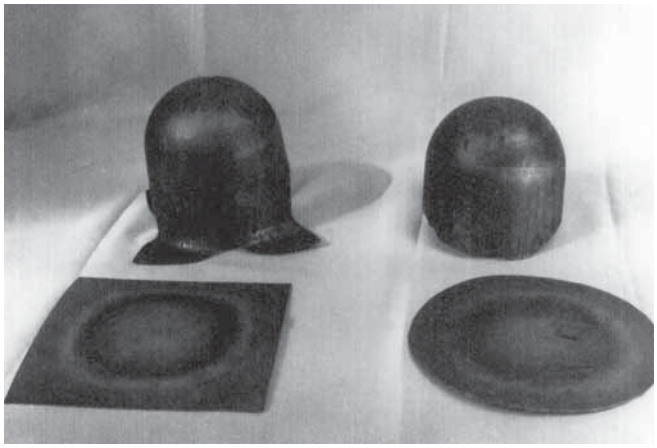


Рис. 2. Изделия типа "баллон" из тонколистовых заготовок квадратной и круглой форм титанового сплава ВТ6

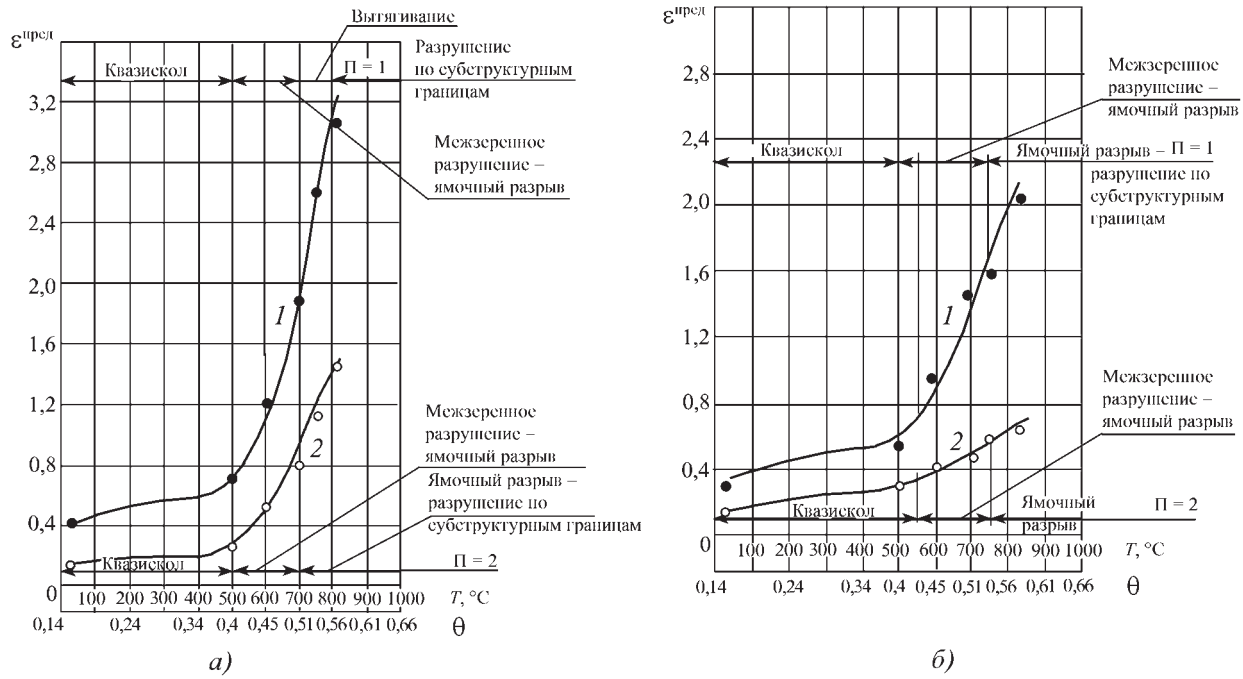


Рис. 3. Температурные зависимости предельной деформации $\varepsilon^{пред}$ титанового сплава ОТ4-1 (лист толщиной 0,3 мм): *а* – $\dot{\varepsilon} = 3{,}4 \cdot 10^{-3}$ с$^{-1}$; *б* – $\dot{\varepsilon} = 4{,}5 \cdot 10^{-2}$ с$^{-1}$; *1* – одноосное растяжение; *2* – двухосное растяжение

зоне, независимо от его механических характеристик не превышает значения 2.

Опытный штамп (рис. 4) был изготовлен для вытяжки натурного изделия, имеющего размеры эллиптического днища 230 и 270 мм, высоту 210 мм и толщину стенки 4 мм согласно рис. 1.

При конструировании рабочих частей штампа использовали рекомендации А.А. Любченко [1] по горячей листовой штамповке толстолистового материала. Штамп имеет складкодержатель, так как коэффициент относительной толщины заготовки равен 60, что характеризует вытягиваемое изделие как промежуточное между тонкостенными (20) и тонкостенными (100) изделиями. Складкодержатель (см. рис. 4) подвешен на цепях, хотя в процессе вытяжки его положение определялось клиньями, входившими в толщину направляющих колонок штампа. Рассчитывали рабочие размеры вытяжной матрицы, радиус ее вытяжного ребра и технологический зазор между матрицей и пуансоном. Профиль рабочей части пуансона и его изготовление определяли в соответствии с трехмерной моделью внутренней поверхности изделия.

Габаритные размеры матрицы и складкодержателя определяли согласно прочностным расчетам исходя из расчета требуемой силы штамповки. При ее расчете использовали аналитические зависимости определения максимальной силы вытяжки по Э. Зибелю, А. Томпенову. При этом учитывали коэффициент объемной полноты (коэффициент формы) изделия, который для штампуемого изделия имеет значение 0,58 [1].

Согласно расчетам для проведения опытной штамповки применяли гидравлический пресс силой 80 кН, со скоростью перемещения траверсы 0,2 м/с. Размеры и контур исходной плоской заготовки определяли с использованием аналитического вида расчета, включающего в себя метод равенства поверхностей. При этом применяли программные продукты для обсчета поверхности трехмерной модели изделия (см. рис. 1) и дополнительно – практическое моделирование в процессе испытаний.

Температурный режим штамповки обеспечивался постоянной необходимой температурой матрицы и

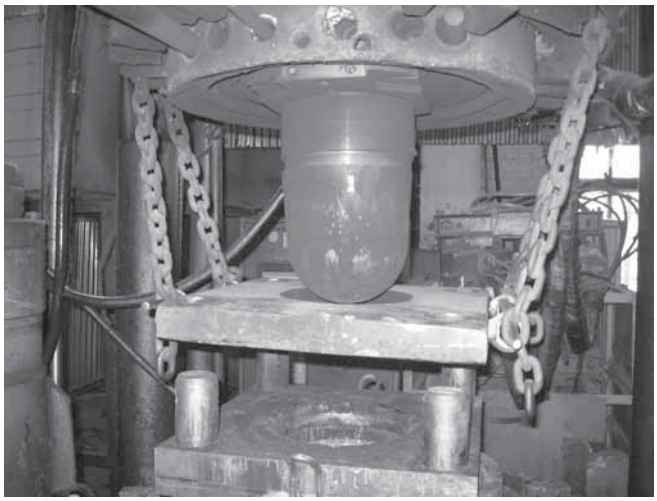


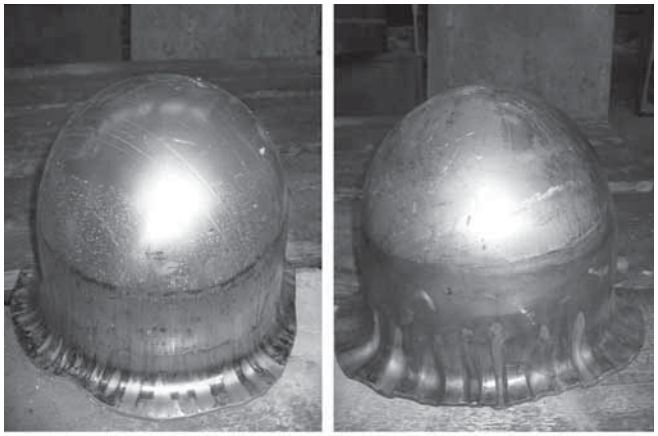
Рис. 4. Опытный штамп для вытяжки оболочки защитного шлема

прижимного кольца с помощью нагревательного устройства, установленного на гидравлическом прессе. По справочным данным, максимальная пластичность сплавов БТА и ВТ14 соответствует интервалу температур 450...500 и 880...940 °С соответственно.

Отработку рабочих элементов матрицы и пуансона, в частности формы вытяжного ребра и технологического зазора между матрицей и пуансона, проводили при вытяжке листовой заготовки бронетанкового алюминия БТА толщиной 4 мм. Его химический состав приведен в таблице, а механические характеристики при 20 °С составляют: предел прочности 340 МПа; относительное удлинение 15 %.

Химический состав БТА, % мас.

Al	Si	Cr	Mn	Zn	Mg	Zr	Fe
Основа	0,15	0,13	0,24	4,5	2,15	0,09	0,12



а) *б)*

Рис. 5. Оболочка защитного шлема из листового материала толщиной 4 мм:
а – из бронетанкового алюминия БТА; *б* – из титанового сплава ВТ14

Рис. 6. Штамповка заготовки защитного шлема из титанового сплава ВТ14 толщиной 4 мм за три перехода

Изделие было получено за один переход (рис. 5, *а*). Вертикальная стенка не имеет складок. Круглая заготовка размером 500 мм была полностью использована в процессе вытяжки из прижима, хотя свободные поля заготовки на последней стадии вытяжки при проталкивании вытянутого изделия через технологический зазор между матрицей и пуансоном составляли 40 мм. Коэффициент вытяжки имел значение в интервале 1,8...2,0 по осям эллиптического днища.

Опытная штамповка оболочки из титанового сплава ВТ14 из заготовки с отработанными размерами с учетом увеличения технологического зазора в силу повышения температуры штамповки от 500 до 800 °С, также дала положительные результаты. Изделие было получено за три перехода (рис. 5, *б*), из-за необходимости подогрева металла фланца заготовки до соблюдения требуемой температуры. Вертикальная стенка не имеет складок. Поля заготовки в отличие от вытяжки бронетанкового алюминия были использованы не полностью. Полученные значения предельного коэффициента вытяжки соответствуют значению 1,8.

Штамповка заготовки защитного шлема из титанового сплава ВТ14 толщиной 4 мм за три перехода показана на рис. 6.

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

• изготовление заготовок защитного шлема из бронетанкового алюминия БТА и титанового сплава ВТ14 толщиной 4 мм возможно методом горячей глубокой вытяжки;

• коэффициент предельной вытяжки трудно деформированных алюминиевых и титановых сплавов при условии создания пластичного состояния металла во фланцевой зоне, независимо от их механических характеристик составляет 1,8...2,0 и соответствует данным В. Бэкофена.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

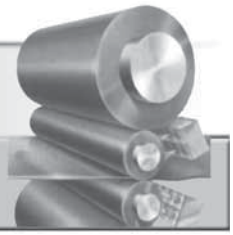
1. **Любченко А.А.** Конструирование штампов и горячая листовая штамповка. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1974. 480 с.

2. **Бэкофен В.** Процессы деформации. Массачусетс. Калифорния. 1972. Пер. с англ. М.: Металлургия, 1977. 288 с.

3. **Золотов М.А., Галкин В.В., Шевченко М.П.** Вытяжка деталей с дифференцированным нагревом заготовок в радиальном направлении // Кузнечно-штамповочное производство. 1990. № 7. С. 14–16.

4. **Штамп** для вытяжки с нагревом: а.с. 1447481, кл. B 21 D 22/20 / М.А. Золотов, В.В. Галкин, М.П. Шевченко, В.В. Гребнев, А.А. Цуканов. Заявл. 8.01.91; опубл. 11.10.92.

Владимир Викторович Галкин, канд. техн. наук, lumi1950@mail.ru;
Анатолий Иванович Поздышев;
Василий Анатольевич Поздышев;
Алексей Вячеславович Вашурин



УДК 621.73

В.Г. Панин *(Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (научно-исследовательский университет))*

Изучение выкатываемости фланцевых колец и факторов интенсификации их формообразования

Сформулированы общие положения по разработке механизма заполнения калибров при горячей раскатке колец из материалов авиационного назначения. Установлены конструктивно-технологические факторы интенсификации формообразования фланцев на образующей кольца. Приведены данные раскатки кольцевых профилей, полученные производственной практикой.

Ключевые слова: раскатка; кольцо; деформация; фланец; профиль; калибр; усадка.

The general provisions for development of mechanism for filling of calibers during the hot pinning-out of rings from materials of the aviation setting are formulated. Set design and technological factors of intensification of formation of the flanges on the generatrix of the ring are established. The data of rolling out of ring profiles obtained by work experience.

Keywords: rolling out; ring; deformation; flange; profile; caliber; shrinkage.

В современном производстве часто происходит смена номенклатуры деталей, поэтому необходимо создавать гибкие процессы, реализуемые на несложном, компактном оборудовании, обеспечивая приближение формы заготовок к форме готовых изделий. При обработке давлением это наиболее просто осуществляется путем локализации очага деформации, что позволяет резко уменьшить площадь контакта, снизить деформационные силы, а следовательно, облегчить и упростить конструкцию оборудования.

Одним из прогрессивных способов получения бесшовных кольцевых заготовок является горячая раскатка на кольцераскатных машинах. Кроме локализации очага деформации горячая раскатка имеет еще ряд характерных особенностей, являющихся преимуществами этого процесса. Среди них следует отметить возможность получения кольцевого рельефа, обеспечение точных размеров полуфабрикатов. Для раскатки характерна существенная неравномерность деформации, поэтому требуется особая тщательность при выборе термомеханических режимов обработки. С другой стороны, неравномерность деформации, большие внеконтактные деформации обусловливают высокие удельные давления, что при правильном выборе режимов позволяет обрабатывать современные жаропрочные никелевые, хромоникелевые, титановые и другие сплавы, такие как, например, ХН68ВМТЮК-ВД, ХН45ВМТЮБР-ИД, ХН65ВМБЮ, ВТ9, ВТ20, ВТ22, ВТ25У.

Простота конструкции, универсальность и гибкость оборудования для раскатки обеспечивают сравнительную легкость его настройки. Известно, что процесс раскатки колец относится к случаю деформации металла при асимметричных граничных условиях. Асимметрия процесса возникает вследствие следующих особенностей:

наличия замкнутого кольцевого контура и его кривизны;

наличия валков неравного диаметра;

дополнительного подпора со стороны центрирующих роликов;

различных условий трения на контактируемых поверхностях.

По существующей методике качественная способность металла заполнять калибр оценивается оформлением типового профиля с двумя фланцами. Полное оформление типового профиля материалами позволяет увеличить высоту фланцев дополнительно на $1/9B$, где B – ширина фланца. Неполное оформление типового профиля приводит к тому, что высоту фланцев уменьшают на $1/9B$. Для перечисленных выше сплавов качественная оценка заполнения калибров неудовлетворительная [1].

Производственной практикой установлено, что фланцы кольца из титановых сплавов выкатываются в одной паре валков более высокими, чем фланцы кольца из жаропрочных сплавов при равных геометрических размерах исходной заготовки и профиля кольца. Известно также, что усадка колец (по наружному диаметру) при горячей раскатке материалов различных структурных групп неодинакова:

усадка колец из титановых сплавов – 0,8 %;

усадка колец из жаропрочных сталей и сплавов, стали 12Х18Н10Т – 1,5 %;

усадка колец из углеродистых и конструкционных сталей – 1,0 %.

Получить максимальное приближение формы заготовки к форме детали можно путем совершенствования технологического процесса, оборудования и оснастки. Известно, что стали и сплавы, из которых изготовляют кольцевые заготовки для газотурбинных двигателей (ГТД), обладают различной способностью заполнять калибры при раскатке. Однако поскольку не выработан критерий, характеризующий эту способность, отсутствуют и количественные характеристики этого свойства, что является одной из причин, сдерживающих применение раскатки для получения экономичных заготовок.

Использование в расчетах формул, не учитывающих способность материалов заполнять калибры, незнание конструктивно-технологических факторов, влияющих на формообразование профиля при раскатке приводит к неправильному выбору предельного формоизменения профилей и в результате сопровождается низким КИМ заготовки, что может также привести к браку – обычно неоформлению угловых зон профиля. Поскольку удельный вес кольцевых фланцевых деталей в общей металлоемкости современного газотурбинного двигателя составляет 15...20 %, а трудоемкость их изготовления в общем объеме трудовых затрат – 10...12 %, исследование процесса заполнения калибров различными материалами при раскатке, а также установление конструктивно-технологических факторов, изучение их влияния на интенсификацию формообразования фланцев будет способствовать получению новых знаний и дальнейшему развитию процесса раскатки бесшовных кольцевых профилей для ГТД.

Несмотря на успехи в изучении теории раскатки колец, механизм заполнения калибров остается невыясненным. Поэтому вопросы получения высоких тонких фланцев на образующей кольца при раскатке изучены недостаточно, соответственно отсутствует возможность прогнозирования их получения, не исследованы факторы интенсификации их формообразования. Все это свидетельствует о целесообразности проведения исследований в этом направлении.

В статье сформулированы общие положения по разработке механизма заполнения калибров:

1. Предложено рассматривать процесс профилирования, как процесс получения фланца на образующей кольца.

2. Предложено количественно оценивать заполнение калибров материалом глубиной внедрения профильного валка h_1 в заготовку прямоугольной формы (чем больше h_1, тем выше фланцы кольца) [2].

Установлены конструктивно-технологические факторы интенсификации формообразования фланцев, а именно: глубина внедрения валков при профилировании будет зависеть:

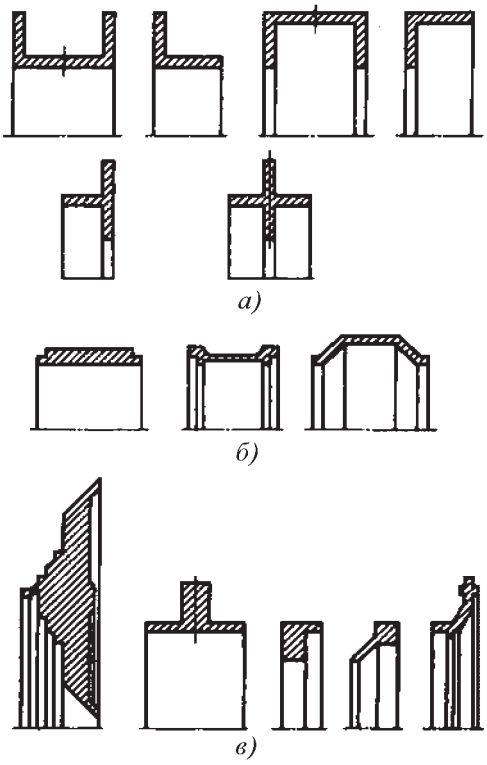


Рис. 1. Типовые формы кольцевых деталей для ГТД: фланцы, лабиринты, промежуточные кольца (*а*); рабочие, трактовые кольца (*б*) и корпусные детали (*в*)

от соотношения площадей контакта $F_1{:}F_2 = K_1$;

толщины исходной заготовки H_0;

диаметров раскатных валков $d_1{:}d_2 = K_2$;

шероховатости их поверхностей ($Ш_1$, $Ш_2$);

применяемой технологической смазки С;

температуры нагрева T и марки деформируемого материала М.

В общем виде предельная высота фланца на образующей кольца $h_1 = f$ [K_1,H_0, K_2, ($Ш_1$, $Ш_2$), С, T, М]. Типы профилей кольцевых деталей ГТД можно разбить на три основные группы (рис. 1).

В настоящее время технологический процесс раскатки колец разрабатывают путем подбора профилей из известного типового набора [3]. При этом не учитывают возможности заполнения калибров различными материалами при той или иной технологической схеме. В результате кольца из титановых и высоколегированных никелевых сплавов часто проектируют с неглубокими канавками или прямоугольного профиля. Более правильно проектировать процесс профилирования раскатных колец исходя из возможностей технологической схемы с учетом факторов, расширяющих эти возможности. Возможности каждой технологической схемы по получению фланцев на кольце должны быть изучены, и тогда, имея научно обоснованные связи размеров профиля с размерами исходной заготовки, технолог всегда спрогнозирует максимальное приближение

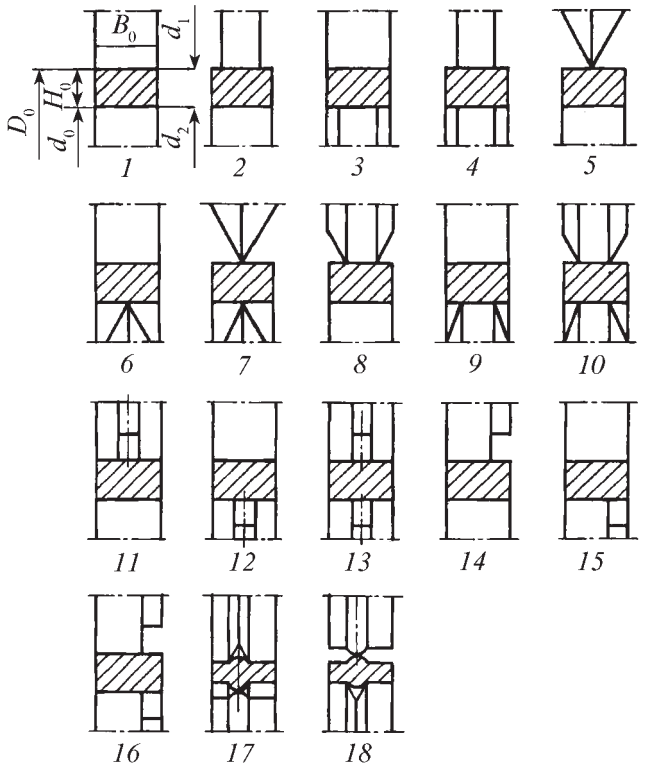


Рис. 2. Классификатор технологических схем деформации кольцевой заготовки при вдавливании цилиндрических (*1–4*), клиновидных (*5–7*), трапецеидальных (*8–10*) и вырезных (*11–18*) валков

формы профильной заготовки к форме чистовой детали.

Разработан классификатор, включающий в себя 18 технологических схем (рис. 2), каждая из которых позволяет выкатывать следующие формы: *2–4* схемы ⊔, ⊓, ⊢-образные; *5–7* схемы ∨, ∧, × -образные; *8–10* схемы ∪, ∩, ⋊ -образные; *11–13* схемы ⊥, ⊤, + -образные; *14–16* схемы ⌋, ⌈, ┤ -образные; *17–18* схемы ⊔ , ⊓ -образные (отбортовка).

Рассмотрим более подробно схемы *11* и *14*. Общепринято при раскатке профильных заготовок (рис. 3) ширину исходной заготовки принимать равной ширине раскатного кольца. Уменьшить площадь контакта инструмента с прокатываемым металлом можно не только за счет изменения его формы, но и за счет изменения ширины исходной заготовки.

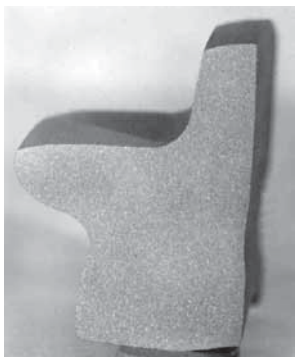


Рис. 3. Поперечное сечение заготовки

Автором статьи предложен способ профилирования, при котором ширину исходной заготовки B_0 принимают меньше одной ширины и больше 2/3 ширины профильного кольца [4]. Процесс формообразования можно разбить на три стадии:

1) вдавливание;
2) вытяжка;
3) боковое выдавливание.

Предложенный способ профилирования назван автором статьи боковым выдавливанием, поскольку окончательная форма профиля получается в результате осевого течения металла.

Рис. 4. Профильная заготовка для крышки лабиринта турбины из сплава ХН68НТЮК-ВД после первого перехода

Технологический процесс (схема *14*) для получения профильных колец для крышки лабиринта турбины (рис. 4) из сплава ХН68НТЮК-ВД следующий:

– получение исходных заготовок под раскат с размерами ∅285×∅180×20 мм;

– раскатка заготовок в первой паре валков до наружного диаметра по фланцу 320 мм. Глубина внедрения профильного валка h_1 = 14 мм;

– раскатка заготовок во второй паре валков до наружного диаметра по фланцу 630 мм, h_1 = 18 мм.

Технологический процесс (схема *11*) для получения профильных колец для кулачка (рис. 5) из сплава ХН45ВМТЮБР-ИД следующий:

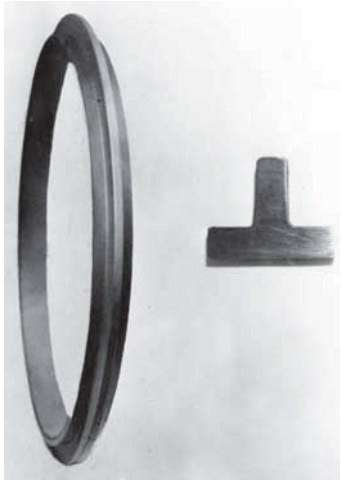


Рис. 5. Профильная заготовка для кулачка из сплава ХН45ВМТЮБР-ИД

получение исходных заготовок под раскат с размерами ∅306×∅190×27 мм;

раскатка заготовок в первой паре валков до наружного диаметра по фланцу 376 мм, h_1 = 18 мм;

раскатка заготовок во второй паре валков до наружного диаметра по фланцу 550 мм, h_1 = 24 мм.

Раскатку кольцевых профилей осуществляли на раскатной машине РМ-1200 в ОАО "Кузнецов". Термическую обработку колец проводили в цеховых условиях в соответствии с заводскими техническими условиями ТУ01-1203. Механические свойства материала профильной заготовки определяли в состоянии после старения. Образцы вырезали в тангенциальном направлении.

Установлено, что партия профильных заготовок для крышек лабиринта турбины и кулачка по рассмотренным схемам удовлетворяет техническим условиям ТУ01-1203. Геометрия колец удовлетворяет требованиям чертежа. Получен экономический эффект.

Выполненная работа показала необходимость продолжения исследований по изучению выкатываемости фланцевых колец и факторов интенсификации их формообразования. Предполагается применить экспериментально-аналитический метод.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

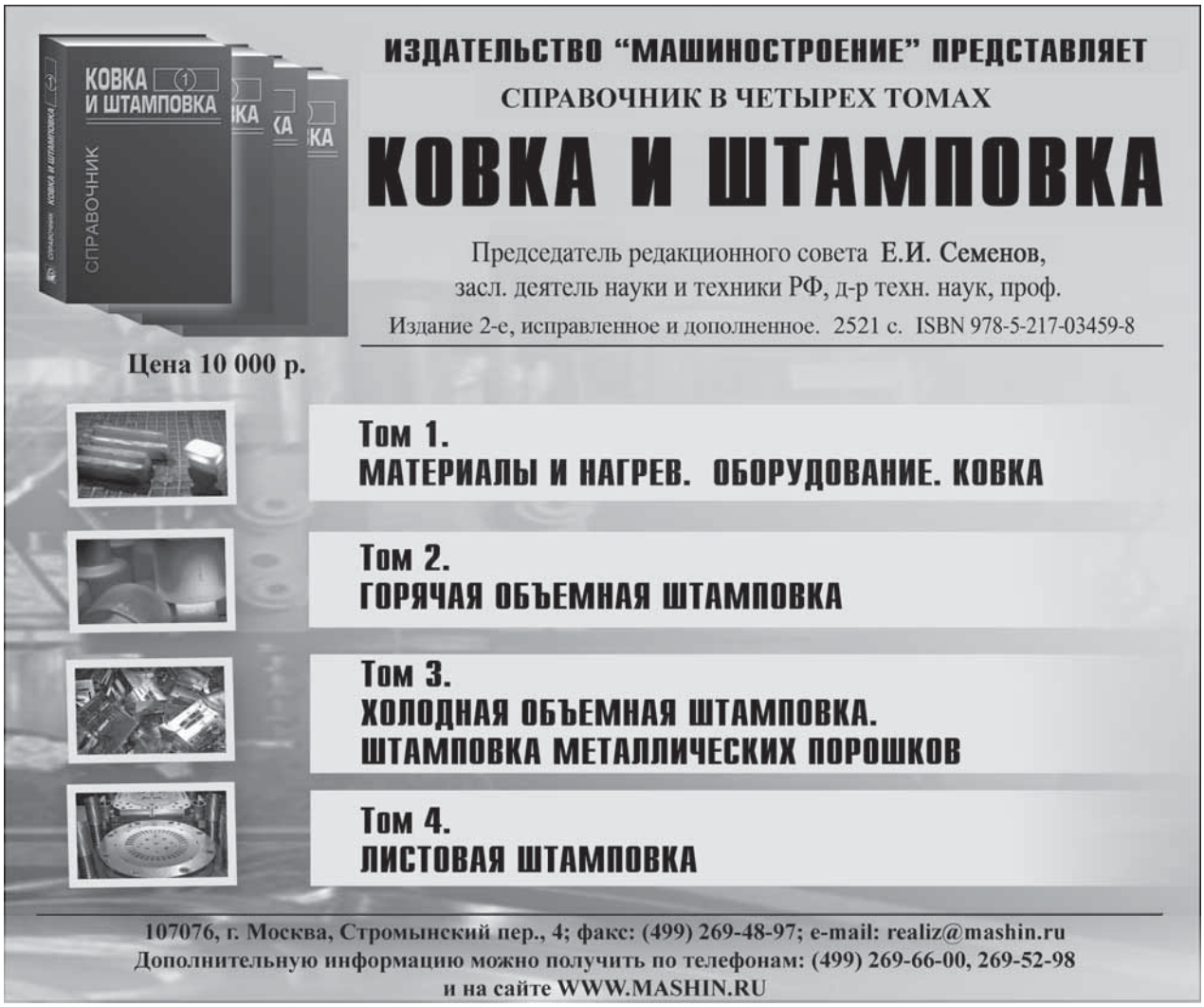
1. **Раскатка** бесшовных кольцевых заготовок малого и среднего диаметров: руководящий технический материал 1.4.8506–88. М.: НИИД, 1988. 49 с.

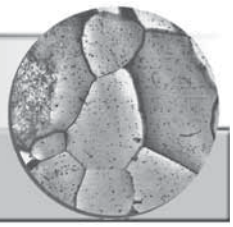
2. **Панин В.Г., Бутаров А.Н.** Влияние площадей контакта валков на заполнение калибров при раскатке с вдавливанием // Кузнечно-штамповочное производство. 1990. № 10. С. 8–10.

3. **ТР367-16–87.** Определение групп сложности, точности и трудоемкости цельнокатаных кольцевых заготовок. М.: ВИЛС, 1985. 6 с.

5. **А. с. 1772973А1 СССР, МКИ[3] В 21 Н 1/06.** Способ получения кольцевых профилей.

Валерий Георгиевич Панин, канд. техн. наук,
val-panin@mail.ru





УДК 621.762

И.А. Савин *(филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ", г. Набережные Челны)*

Исследование характеристик износостойких покрытий, наносимых на режущие инструменты сложной формы методом катодно-ионной бомбардировки

Рассмотрены вопросы повышения срока эксплуатации режущих инструментов сложной формы за счет нанесения на их рабочие поверхности износостойких покрытий, полученных методом конденсации из плазменной фазы в вакууме с ионной бомбардировкой – метод катодно-ионной бомбардировки КИБ (PVD), а также специфика процесса нанесения покрытий на многолезвийные инструменты сложной формы в зависимости от ориентации сложнопрофильных поверхностей в потоке плазмы. Даны рекомендации по оптимизации параметров нанесения покрытий с оптимальными эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: износостойкое покрытие; ионная бомбардировка; режущий инструмент.

The problems of improving the term of complex shape cutting tools by drawing on their working surfaces of wear-resistant coatings obtained by condensation from plasma phase in vacuum with ion bombardment – the method of cathode-ion bombardment and specificity of the coating process on multiblade tools of complex shape depending on the orientation of the complex-surfaces in the plasma flow are considered. The recommendations for optimization of parameters of the coatings with optimal performance are given.

Keywords: wear-resistant coating; ion bombardment; cutting tool.

Рабочая часть инструментов, выполняющих операции фрезерования, зубо- и резьбонарезания, сверления, включает в себя от двух до нескольких десятков режущих элементов, имеющих, как правило, сложную криволинейную форму рабочих поверхностей. В процессе нанесения на эти инструменты вакуумно-плазменных покрытий (метод катодно-ионной бомбардировки (КИБ)) положение каждого из таких элементов в камере будет определяться их количеством и габаритными размерами, а также размерами инструмента в целом.

Вследствие неоднородности потока плазмы на рабочих поверхностях инструмента, особенно сложнопрофильного, формируются покрытия, значительно отличающиеся по своим основным характеристикам (таким, как структура, сингория, параметры решетки, стехиометрия состава, толщина и микротвердость покрытия, прочность его сцепления с основой и т.д.). Это неизбежно приводит к различию в износостойкости поверхностей сложнопрофильных инструментов и является причиной снижения работоспособности инструментов с покрытиями.

При нанесении покрытий на сложнорежущие многолезвийные инструменты нельзя ограничиваться только оптимизацией технологических параметров нанесения покрытий из-за невозможности обеспечения оптимальных по качеству покрытий на всех рабочих поверхностях инструмента. Таким образом, одной из важнейших задач общей проблемы повышения качества и работоспособности сложнопрофильных многолезвийных инструментов является установление закономерностей осаждения и оценки характеристик покрытий, получаемых на поверхностях многолезвийных инструментов в зависимости от фактического положения каждой рабочей поверхности инструмента в вакуумной камере установки.

Методика исследований состояла из двух основных этапов: оптимизации технологических режимов нанесения покрытия и исследования влияния геометрических факторов на толщину и некоторые свойства покрытия с установлением эмпирических зависимостей между указанными факторами. Большое число факторов, оказывающих одновременное влияние на характеристики покрытия, потребовало их классификации, а также исследования взаимовлияния их друг на друга.

Для идентификации положения каждой рабочей поверхности сложнопрофильного режущего инструмента относительно потока плазмы предложена и реализована методика, заключавшаяся в том, что сложнопрофильные поверхности моделировались как совокупность элементарных площадок, координаты которых строго фиксировались относительно потока плаз-

мы. Сложность заключалась в том, что габаритные размеры инструмента зачастую были сопоставимы с эффективным диаметром плазменного потока.

Экспериментальное изучение процесса осаждения и свойств покрытий на реальных инструментах является сложной и трудоемкой задачей ввиду больших различий в габаритных размерах, площади поверхности, радиусов кривизны и т.п. Введение системы координат позволяет значительно упростить эту систему путем моделирования криволинейных участков плоскими образцами, которые удобны для проведения металлографических, рентгеноструктурных, электронных и других исследований. Анализ различных вариантов координирования элементарных площадок показал, что наиболее рациональной для случая нанесения износостойких покрытий методом КИБ на инструменты из быстрорежущей стали является линейно-угловая система координат, в которой две линейные координаты характеризуют положение элементарной площадки в потоке плазмы, а угловая – ее ориентацию относительно оси этого потока. В качестве координат были приняты:

R – расстояние от элементарной площадки до оси потока плазмы; позволило установить зависимость характеристик покрытия от распределения плазмы в поперечном сечении потока;

L – расстояние от элементарной площадки до поверхности источника плазмы (катода); дало возможность выявить неоднородность характеристик покрытия по длине потока;

λ – угол падения потока на элементарную площадку; определяет характеристики покрытия в зависимости от взаимодействия составляющих потока плазмы с наклонной поверхностью подложки.

В качестве образцов использовали пластины специальной формы из сталей Р6М5 и Р6М5К5. Твердость образцов после стандартной термической обработки 63...65 HRC. Для обеспечения точности при измерении толщины покрытия все поверхности образцов доводили на чугунном притире с применением алмазных паст до параметра шероховатости не более Ra = 0,08 мкм. В камере установки "Булат-3Т" образцы размещали в специальных струбцинах, что позволяло точно выдерживать заданные координаты и положение образцов, а также осуществлять затенение образцов в необходимой степени.

Исследования проводили с использованием покрытий TiN, наиболее широко распространенных в промышленности для нанесения на режущие инструменты из быстрорежущей и инструментальной легированной сталей широкой номенклатуры. Нанесение покрытий осуществляли на серийных установках "Булат-3Т". В качестве катода использовали титан ВТ1-00, в качестве газа-реагента – азот особой чистоты ОСЧ. Максимальную температуру на поверхности образца контролировали с помощью серийного инфракрасного пирометра.

Толщину измеряли:

– по толщине ступеньки на границе покрытия и специально затененного участка поверхности (маски);

– прямым измерением на поверхности излома или разреза образца;

– на металлографическом микроскопе по ширине сечения слоя на косом шлифе рабочей поверхности образца.

По величине привеса определяли качественное различие толщины покрытия. Измеряли микротвердость поверхности косых шлифов и непосредственно поверхности покрытия.

Результаты оптимизации технологического процесса нанесения покрытий были использованы при нанесении износостойких покрытий на режущие инструменты ОАО "КамАЗ".

В результате участия в исследовательских работах кафедры "Резание материалов" МГТУ Мосстанкин под руководством проф. А.С. Верещака и кафедры ТММСИ КамПИ (г. Набережные Челны) под руководством С.В. Касьянова были проведены многочисленные исследования, по итогам которых сделаны следующие выводы.

При изучении влияния тока дугового разряда I_g, во многом определяющего интенсивность испарения титана с поверхности электрода, установлено, что с повышением тока дуги скорость осаждения покрытия монотонно возрастает, что приводит к повышению производительности процесса. В то же время наблюдали значительное увеличение параметра шероховатости поверхности при значениях тока выше 100 А. Обнаружено, что в этих условиях в покрытии повышается содержание α-Ti в виде капельной фазы, что и является причиной возрастания параметра шероховатости. За счет этих капель увеличивается склонность к адгезионному схватыванию с обрабатываемым материалом, что приводит к резкому снижению работоспособности инструментов с такими покрытиями [1, 2].

Исследования влияния напряжения ионной бомбардировки $U_{и.б}$ привели к следующим результатам. При $U_{и.б}$ менее 500 В эффект бомбардировки выражен очень слабо. В данном случае конденсация покрытия осуществляется на непрогретую подложку, что не обеспечивает заметной прочности сцепления покрытия с основой. При прокалывании на твердомере Роквелла заметны значительные отслаивания покрытия, в 8–12 раз превышающие площадь отпечатка (рис. 1).

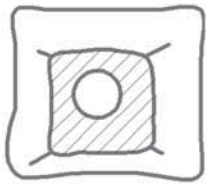


Рис. 1. Схема разрушения покрытия при прокалывании на твердомере Роквелла

При этом покрытие имеет низкую микротвердость H_{μ} = $= (12...15)\cdot 10^3$ МПа. Параметры его кристаллической решетки значительно отличаются от стехиометрического состава нитрида титана (a = 4,22...4,23 Å)[2].

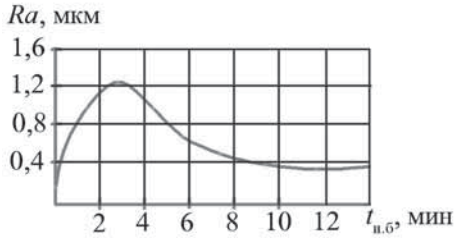


Рис. 2. Зависимость параметра шероховатости *Ra* поверхности от времени ионной бомбардировки $t_{и.б}$

Повышение напряжения ионной бомбардировки до 1200 В позволяет получать более качественные покрытия, обладающие значительной прочностью сцепления с основой. Например, при $U_{и.б} = 1220$ В и нагреве образцов из БРС в процессе ионной бомбардировки до 500 °С с последующим нанесением покрытия отслаивание практически отсутствовало, микротвердость $H_{\mu} = (28...30)\cdot 10^3$ МПа, а параметр решетки стал ближе с стехиометрическому нитриду титана (a = 4,245 Å). Дальнейшее повышение напряжения ионной бомбардировки до 1500 В привело к появлению на режущих кромках зон с пониженной твердостью, в результате превышения температур над пределом теплостойкости инструментального материала.

Длительность ионной бомбардировки является вторым и не менее важным параметром получения качественного покрытия. Именно длительность определяет степень изменения исходного рельефа поверхности основы за счет ионного травления [3, 4]. Изменение времени ионной бомбардировки в интервале 0,5...10 мин при прочих постоянных условиях показало, что наиболее интенсивно процесс ионного травления воздействует на поверхность в первые 2 мин, а после 4...5 мин микрорельеф формируется полностью (рис. 2).

Доказано, что степень изменения шероховатости обусловлена размером зерен основы, так как процесс их травления идет значительно медленнее, чем межзеренных границ. При этом особое внимание для обеспечения прочного сцепления с основой необходимо уделить достижению высокой и равномерной температуры по всему объему инструмента [1, 5].

При нанесении TiN на инструменты различной массы время ионной бомбардировки рекомендовано назначать с учетом скорости их охлаждения после ее окончания. Прогрев считается достаточным при достижении постоянной скорости охлаждения после нескольких циклов воздействия бомбардировки.

Исследования влияния напряжения конденсации покрытия $U_{к.п}$ привели к следующим результатам. Напряжение конденсации напрямую влияет на свойства покрытия, так как именно оно определяет энергию потока ионов при формировании покрытия класса TiN, обеспечивая постоянство температуры инструмента в процессе осаждения покрытия, что влияет на

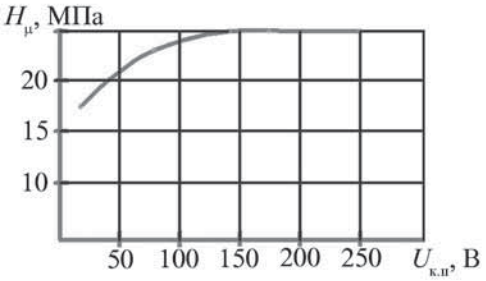


Рис. 3. Зависимость микротвердости H_{μ} износостойкого покрытия от напряжения конденсации покрытия $U_{к.п}$

его микротвердость. Выявлено, что с ростом $U_{к.п}$ микротвердость увеличивается, достигая максимума при напряжении около 200 В. Дальнейший рост напряжения не приводит к значимым изменениям микротвердости, но при напряжении более 350 В резко падает скорость осаждения покрытия в результате увеличения скорости распыления поверхностного слоя, так что этот эффект становится преобладающим (рис. 3).

При нанесении покрытий TiN на массивные инструменты предложено увеличивать напряжение от 180...200 до 250...300 В, несмотря на потерю производительности из-за снижения скорости осаждения покрытия.

Давление p газа-реагента (при нанесении покрытия TiN им является азот) является важным параметром, определяющим комплекс характеристик поверхностного слоя [1, 5]. Установлено, что максимальная микротвердость покрытия обеспечивается при давлении азота p = 0,02...0,05 Па (рис. 4). Однако покрытия, полученные при таких давлениях, являются хрупкими. Это видно при исследовании границ отпечатка, сделанного на твердомере Роквелла. В слое видна частая сетка радиальных и концентричных трещин, что приводит к дальнейшим сколам покрытия и его локальным отслоениям. На ряде образцов наблюдали образование трещин покрытия сразу после нанесения без какого-либо воздействия на инструмент.

Рентгеноструктурный анализ показал [4], что в интервале давлений азота ширина дифракционных максимумов, характеризующих микроискажения решетки, максимальна. По мере уменьшения давления азота микротвердость покрытия TiN резко падает, в его

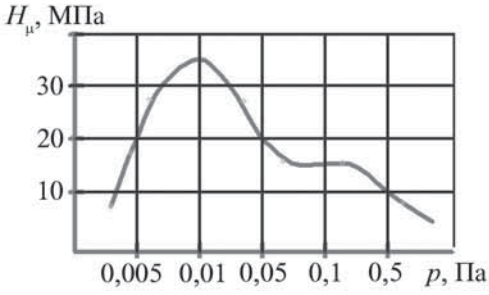


Рис. 4. Зависимость микротвердости H_{μ} износостойкого покрытия от давления p газа-реагента

объеме нарастает количество отдельных включений α-Ti, так как значительное количество титана уже не может участвовать в образовании нитрида из-за недостатка азота. Вследствие своей склонности к схватыванию с обрабатываемым материалом включения α-Ti резко ухудшают износостойкость покрытия. Именно поэтому [1–5] такие покрытия считают дефектными.

Увеличение p от 0,05 до 0,5 Па приводит к некоторому снижению микротвердости (см. рис. 4), вместе с этим уменьшая микроискажения решетки, ее параметр приближается к величине, характерной для нитрида титана стехиометрического состава. Вследствие этого существенно снижается хрупкость покрытия и степень дефектности становится наименьшей. Уменьшение давления азота ниже 0,5 Па приводит к заметному снижению средней длины свободного пробега ионов Ti из-за резкого увеличения вероятности соударений с избыточными молекулами азота. В результате падает скорость осаждения покрытия, уменьшаются его микротвердость и износостойкость вследствие деформации кристаллической решетки TiN избыточными молекулами азота.

В результате проведенного анализа выявлены причины, обусловливающие недостаточную надежность режущих инструментов с покрытиями из-за неоднородности нанесенного покрытия. Приняты следующие оптимальные технологические режимы: ток дуги I_g = 90...100 А; напряжение ионной бомбардировки $U_{и.б}$ = 1000...1200 В; время ионной бомбардировки 5...7 мин; температура ионной бомбардировки 500...550 °С; напряжение конденсации покрытия $U_{к.п}$ = 180...300 В; температура конденсации 350...450 °С; давление азота p = 0,02...0,05 Па.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Верещака А.С.** Повышение работоспособности режущих инструментов нанесением износостойких покрытий: дис. ... д-ра техн. наук. М., 1986. 520 с.

2. **Верещака А.С.** Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1993. 336 с.

3. **Савин И.А.** Повышение эффективности процессов резания в операциях поточного производства на основе проектирования альтернативных вариантов их реализации: дис. ... канд. техн. наук. М., 1995. 206 с.

4. **Тонконогий В.М.** Разработка методов повышения работоспособности многолезвийных сложнопрофильных инструментов с покрытием: дис. ... канд. техн. наук. М., 1987. 250 с.

5. **Тонконогий В.М., Касьянов С.В., Савин И.А.** Выбор состава и контроль качества износостойких покрытий. Смазочно-охлаждающие технологические средства при механической обработке: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Ульяновск: Ульяновский политехнический институт, 1993. С. 87–88.

Игорь Алексеевич Савин, канд. техн. наук,
savin64@rambler.ru

Поздравляем!

Анатолия Ивановича Капустина

кандидата технических наук

с 80-летием

Анатолий Иванович родился 9 сентября 1932 г. в Ленинграде. После окончания школы № 157 г. Ленинграда в 1950 г. поступил в Ленинградский военно-механический институт. Затем работал на заводе им. К. Либнехта, пройдя путь от помощника мастера до главного технолога завода.

Работая в крупнейшем научно-исследовательском институте, ныне ГНПП "Темп" (г. Москва), сначала заместителем директора, затем генеральным директором, А.И. Капустин вложил много сил и энергии в становление и развитие отрасли боеприпасов и спецхимии. В настоящее время он является главным научным сотрудником ГНПП "Темп".

Анатолий Иванович – один из крупнейших технологов в области заготовительных производств, имеет большое количество опубликованных работ и изобретений. А.И. Капустин является членом редакционного совета нашего журнала.

Анатолий Иванович Капустин дважды награжден орденом Трудового Красного Знамени, многими медалями.

Коллектив редакции и редакционный совет журнала желают Анатолию Ивановичу Капустину крепкого здоровья, благополучия, новых профессиональных достижений.

УДК 621

О.С. Кошелев *(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева)*

К вопросу о группировании деталей с точки зрения общности заготовки для их получения

Рассмотрены причины снижения серийности при производстве деталей в машиностроении, а следовательно, и причины удорожания производства. Предложен алгоритм возможного повышения серийности производства при использовании более прогрессивного с точки зрения прочности заготовки.

Ключевые слова: группирование; общая заготовка; нарушение структуры заготовки; общность структуры заготовки; типизация технологического процесса; серийность производства.

The reasons of decrease of series during details production in mechanical engineering and thus reasons increased cost of production are considered. The algorithm for possible of production series is offered using more progressive in terms of blank strength.

Keywords: grouping; general blank; structure blank breaking; structure blank generality; typification of technological process; production series.

Современное развитие машиностроения характеризуется тем, что под влиянием различных факторов число изделий одного типа начинает резко сокращаться. В машиностроении 85 % изделий не выпускаются количеством более 50 шт. в год, что закономерно привело к сокращению числа деталей в изделиях, получаемых методами ОМД и литья, т.е. процессами, позволяющими управлять не только формой детали, но и структурой материала, а следовательно, и прочностными характеристиками деталей. Таким образом, производство этими методами ограниченного числа деталей экономически не выгодно.

Указанная тенденция еще более усугубляется появлением металлорежущего оборудования, оснащенного системами ЧПУ:

– минимальная цена единицы такого вида оборудования исчисляется несколькими миллионами рублей;

– в качестве заготовок при получении деталей на оборудовании с ЧПУ чаще всего применяют прокат или слиток, т.е. заготовки, структура которых сформирована для массового производства и не всегда может быть подобрана с учетом условий работы детали. Это ведет к необходимости увеличивать размер деталей, уменьшать коэффициент использования материала даже в условиях наметившейся тенденции сокращения оптимальных сроков эксплуатации готовых изделий, т.е. условия повторяемости серий. Кроме того, такой подход ведет либо к удорожанию производства деталей летательных аппаратов и транспортных машин, либо к уменьшению их коэффициента полезного действия (более крупная деталь – это ее большая масса, а значит, меньшая возможность перемещения полезного груза на таком летательном аппарате или необходимость перевозить с учетом массы транспортной машины большие грузы, а следовательно, и больший расход топлива);

– при использовании заготовок, например, штампованных или литых, более приближенных по своей форме к готовой детали, ряд функций с металлорежущего станка можно снять, т.е. сделать его более дешевым.

В указанных условиях стоимость автоматизации производственных процессов приобретает существенную роль.

Устранить перечисленные проблемы в производстве изделий пытаются различными способами, описанными в технической литературе и ГОСТах. Среди таких методов основными являются:

– повышение серийности изделия и его составных частей при изготовлении (обработка, сборка, испытание) за счет стандартизации, унификации и обеспечения конструктивного подобия;

– применение технологических решений, основанных на типизации процессов и других формах их организации;

– применение стандартных, приспособленных к определенной форме детали, средств технологического оснащения, обеспечивающих повышение уровня механизации и автоматизации труда в производстве.

Перечисленные приемы в большинстве своем опираются на:

– унификацию деталей по форме и подобию поверхностей;

– унификацию узлов по схожести их конструкций;

– использование апробированных и освоенных производством конструкторских и технологических решений.

Таким образом, прослеживается попытка этим путем уйти от единичного производства в массовое или серийное со всеми их преимуществами перед единичным производством. В последнее время при изготовлении деталей механической обработкой все большее распространение получает метод группирования изделий, в основе которого – объединение деталей в группы по признаку схожести обрабатываемых поверхностей. Вполне логичный подход, если основываться на том, что механическая обработка имеет дело, в первую очередь, с поверхностью, которую надо получить тем или иным способом.

Внедрение новых приемов и принципов производства, основанных на использовании заготовки, в которой и структура материала отвечала бы назначению детали, зачастую сдерживается, поскольку требует большего времени, усилий и затрат на их реализацию. Кроме того, внедрение новых технологий является целесообразным только тогда, когда они гарантировано приносят большую выгоду по сравнению с затратами на реализацию существующих технологий, а при небольших сериях применять специальные методы для получения конкретной заготовки не всегда целесообразно.

Причины складывающейся ситуации, на взгляд автора статьи, в следующем:

1. Отсутствуют научно-обоснованные четкие принципы классификации деталей по принципу подобия структуры одного и того же материала в ограниченном "разбегом" линейных размеров объеме, т.е. есть группа деталей, например, ступенчатых валов, отличающихся размерами в каких-то пределах. Эти детали в определенных узлах выполняют одинаковые или близкие функции при одинаковых или разных по величине нагрузках. В чем они должны иметь общую структуру с точки зрения прочностных и других характеристик, отвечающих за работоспособность детали, и в чем эта структура должна отличаться при изменении размеров объема детали[1]?

2. Отсутствуют четкие ответы на вопросы: нарушается ли структура[2] заготовки при обработке детали на финишных операциях (чаще всего – это резание)? Каковы последствия такого нарушения с точки зрения изменения работоспособности детали? В каких пределах такие нарушения возможны, а в каких нет? Такие показатели должны быть разработаны в относительных единицах, например, в процентах.

3. Отсутствуют четкие ответы на вопросы: можно ли и как быстро исправить такие нарушения? При каких значениях этих нарушений такую работу в готовой детали провести можно, а при каких – нет?

Ответив на эти вопросы можно построить технологическую подготовку процесса производства по следующему принципу:

1. Известными методами (например, [1]) провести группирование деталей, подлежащих обработке по принципу идентичности поверхностей.

2. Провести анализ общности структур материала деталей с точки зрения прочностных и других характеристик, отвечающих за работоспособность детали[3] при разных ее размерах.

3. Провести анализ нарушения общности структур материала деталей, получаемых из одинаковой заготовки, при их финишной обработке.

4. Провести анализ последствий нарушения общности структур материала с точки зрения прочностных и других характеристик, отвечающих за работоспособность детали.

5. Провести перегруппирование деталей в группах, полученных по п. 1, для использования более прогрессивной с точки зрения обеспечения работоспособности детали заготовки.

6. Соответствующим образом с учетом общности заготовки окончательно разработать технологический процесс.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Базров Б.М.** Основы построения технологического процесса изготовления детали // Справочник. Инженерный журнал. 2006. № 12. 2007. № 2, 11. Приложение.

Олег Сергеевич Кошелев, д-р техн. наук,
omd@nntu.nnov.ru

[1] Отметим, что способы формирования желаемой структуры материала в известном объеме известны.

[2] Сами нарушения определить можно. Не рассмотрены на числовом уровне последствия этих нарушений структуры.

[3] При распространении метода такие параметры могли бы быть стандартизованы.

Памяти Григория Ильича Сильмана

(12.08.1935–28.07.2012)

28 июля 2012 г. на семьдесят седьмом году жизни после тяжелой продолжительной болезни скончался заслуженный деятель науки РФ, заслуженный ученый Брянской области, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой "Технология конструкционных материалов и ремонт машин" Брянской государственной инженерно-технологической академии Григорий Ильич Сильман.

Григорий Ильич Сильман родился в г. Брянске 12 августа 1935 г. После окончания Брянского института транспортного машиностроения работал на Любохонском чугунолитейном заводе (ныне ОАО "Сантехлит") и Брянском заводе "Строммашина" (ныне "СММ-холдинг"). С 1963 по 1966 г. учился в аспирантуре в Тульском политехническом институте. После окончания аспирантуры и защиты кандидатской диссертации, посвященной влиянию модифицирования на термодинамику и кинетику графитизации ковкого чугуна, работал начальником созданной им литейно-металлургической лаборатории в Тульском филиале ВНИИЛтекмаш (ПКТИмаш) и по совместительству преподавал в Тульском политехническом институте. Под его руководством разработаны новые сплавы и технологические процессы, широко внедренные на предприятиях Минлегпищемаша СССР.

С 1972 г. Григорий Ильич связал свою трудовую деятельность с Брянским технологическим институтом (ныне Брянская государственная инженерно-технологическая академия). С 1973 г. – заведующий кафедрой "Технология конструкционных материалов и ремонт машин". В 1988 г. защитил докторскую диссертацию, а в 1989 г. утвержден в ученом звании профессора.

За время работы в вузе Г.И. Сильман проявил себя высококвалифицированным специалистом, пользующимся авторитетом у преподавателей и студентов. Он проводил большую учебно-методическую, научную и изобретательскую работу, организовал и возглавил кафедру и научно-исследовательскую материаловедческую лабораторию.

Г.И. Сильман – автор более 450 научных и методических работ (в том числе 7 монографий, 4 справочников, учебника, 11 учебных пособий) и 45 изобретений. Григорий Ильич подготовил 17 кандидатов наук, участвовал в работе диссертационных советов в качестве члена и председателя.

Многие из разработок Г.И. Сильмана внедрены в производство на брянских заводах, на предприятиях Подмосковья, Тулы, Воронежа, Свердловска, Пскова.

Григорий Ильич – лауреат премий им. Д.К. Чернова и Минвуза Украины, член редколлегии журнала "Металловедение и термическая обработка металлов", редактор 8 межвузовских сборников научных работ, член Нью-Йоркской академии наук, действительный член Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности, награжден медалью ордена "За заслуги перед Отечеством", медалями, почетными знаками и грамотами Минобрнауки России и администрации Брянской области.

Коллектив кафедры "Технология конструкционных материалов и ремонт машин" Брянской государственной инженерно-технологической академии и редакция нашего журнала выражают искренние соболезнования родным и близким Григория Ильича Сильмана

ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромынский пер., 4
Учредитель ООО "Издательство Машиностроение". **E-mail: zpm@mashin.ru**
Телефоны редакции журнала: (499) 268-47-19, 268-36-54, 268-69-19. **http://www.mashin.ru**
Дизайнер *Поджиботов К.Ю.* Технический редактор *Жиркина С.А.* Корректоры *Сажина Л.И., Сонюшкина Л.Е.*
Сдано в набор 12.07.2012 г. Подписано в печать 22.08.2012 г. Формат 60×88 1/8
Усл. печ. л. 5,88. Уч.-изд. л. 7,28. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство Машиностроение".
Отпечатано в ООО "Белый ветер". 115407, Москва, Нагатинская наб., д. 54, пом. 4.

ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

ИДЕОЛОГИЯ КОНСТРУИРОВАНИЯ

А.Ф. Крайнев **384 с.** **ISBN 5-217-03172-7**

Содержит систему принципов, тенденций и идей совершенствования конструкций (структуры, геометрии) объектов искусственного мира. От известных аналогов отличается новой концепцией теории механизмов и машин. Суть новой концепции заключается в выборе или синтезе структурной схемы, в которой были бы закодированы (по аналогии с хромосомой) самые совершенные конструктивные решения. Такой выбор или синтез предусматривает более точную и правильную взаимосвязь схемных представлений, конструктивных решений (с учетом зазоров, погрешностей изготовления, деформаций, трения), материалов и технологии изготовления. Используя данную систему, можно не только выбирать лучшие схемы и конструкции из числа известных, но и создавать новые более совершенные устройства. Содержание основных разделов построено на примерах из компьютерного банка (схем и конструктивных решений), составленного автором. Приведена методология построения банка и даны отдельные его фрагменты.

Для инженеров-конструкторов, научных работников, преподавателей и студентов втузов.

Цена 660 р.

УДИВИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

А.Ф. Крайнев **120 с.** **ISBN 5-217-03276-6**

В краткой и популярной форме, в основном в виде красочных рисунков приведены начальные сведения о физических явлениях и закономерностях процессов, встречающихся в современных машинах.

Рассказано, как бороться с трением, инерцией и вибрациями и каким удивительным образом они служат человеку. На большом числе примеров продемонстрировано преобразование простого рычага в сложнейшие механизмы и не менее удивительное превращение клина в винт, вентилятор, в шнек мясорубки, в несущий винт вертолета и даже в турбовентиляторный двигатель.

Представлены "прозрачными" лифт, эскалатор, грузоподъемный кран и экскаватор, пресс, двигатель внутреннего сгорания, коробка передач, гидронасос и гидромотор, гидроэлектростанция, обрабатывающий станок и многое другое.

В приведенных пояснениях удалось обойтись без математических формул.

Книга рассчитана на широкий круг читателей, в том числе учащихся.

Для понимания представленных решений не нужно быть специалистом в данной области, достаточно иметь самые элементарные знания физики.

Цена 484 р.

Приобрести книгу по цене издателя можно, прислав заявку по почте: 107076, г. Москва, Стромынский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru. Информация по тел.: (499) 269-66-00, 269-52-98 и на сайте WWW.MASHIN.RU