ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(Кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства)

№ 1 январь 2009

Председатель редакционного совета и Главный редактор
СЕМЁНОВ Е.И.

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

Зам. Главного редактора:
КЛЕЙЗЕР П.Е.
СЕРИКОВА Е.А.

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

Ответственные за подготовку и выпуск номера:
ДЮБКОВА Н.В.
СЕРИКОВА Е.А.
МАКАРЕНКО Е.Д.
ГАНЖЕНКО А.Г.

Журнал зарегистрирован в Государственном Комитете Российской Федерации по печати.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-12218 от 29.03.02

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Литейное и сварочное производства

Сенопальников В.М., Сивков В.Л. Механизм образования осевой неоднородности в непрерывном слитке . . . 3
Питкя С.А., Марков В.В. Повышение эффективности рафинирования сплавов фильтрованием . . . 5
Чайкин В.А., Чайкина Н.В. Сравнительный анализ высокопрочных чугунов, полученных модифицированием в ковше и в форме . . . 7
Леушин И.О., Беляев С.В., Крюкова И.С., Казакова И.В. Противопригарные покрытия на основе отходов гальванического производства для стальных отливок . . . 12
Селянин И.Ф., Феоктистов А.В., Мочалов С.П., Бедарев С.А., Клопов В.И. Геометрические параметры шахтных печей, определенные по критериям конвективного теплообмена . . . 15
Овчинников В.В., Смирнов С.В., Гуреева М.А. Разработка технологии изготовления сварных игольчатых втулок для крепления деталей из композиционных материалов . . . 18

Кузнечно-штамповочное производство

Шестаков Н.А., Субич В.Н., Дёмин В.А. Прессование труб из некомпактных материалов . . . 22
Илюшкин М.В., Марковцев В.А., Лазарев И.И. Выбор оптимальной формы ножа для рубки профилей замкнутого типа в штампах с помощью программы ANSYS/LS-DYNA . . . 29

Прокатно-волочильное производство

Филиппов А.А., Пачурин Г.В. Изготовление калиброванного проката под холодную высадку крепежных изделий из стали 38ХА без обточки поверхностных дефектов . . . 32

Материаловедение и новые материалы

Беляков А.И., Беляков А.А., Маццарелли Д., Жуков А.А. Механические свойства чугуна с шаровидным графитом при повышенных температурах . . . 37
Палавин Р.Н., Колганов В.Н., Коровин В.А., Леушин И.О., Степанов П.П., Киров А.С. Повышение эксплуатационной стойкости литых валков горячей прокатки . . . 45

Информация

Довыденков В.А., Фетисов Г.П. Модель для расчета вязкости композиций порошок–связующее для получения заготовок путем их литья и спекания . . . 47
Промышленные выставки в феврале–мае 2009 г. . . . 50
Указатель статей, опубликованных в журнале в 2008 г. . . . 52

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

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

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

© "Издательство "Машиностроение", "Заготовительные производства в машиностроении", 2009

SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

BLANKING PRODUCTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

(Forging and stamping, foundry and others productions)

№ 1 January 2009

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

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

Editorial Assistants:
KLEYZER P.E.
SERIKOVA E.A.

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

This issue prepared with assistance of specialists:
DYUBKOVA N.V.
SERIKOVA E.A.
MAKARENKO E.D.
GANZHENKO A.G.

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

An advertiser is responsible for the promotional materials

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

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

CONTENTS

Casting and Welding Productions

Senopalnikov V.M., Sivkov V.L. Mechanism of axial heterogeneity formation in continuous ingot . . . 3
Pitkya S.A., Markov V.V. Increase of finishing alloys efficiency by filtering . . . 5
Chaykin V.A., Chaykina N.V. Comparative analysis of high-test cast irons obtained by ladle and mold inoculation . . . 7
Leushin I.O., Belyaev S.V., Kryukova I.S., Kazakova I.V. Parting paints based on galvanics waste products for steel castings . . . 12
Selyanin I.F., Feoktistov A.V., Mochalov S.P., Bedarev S.A., Klopov V.I. Blast furnaces geometrical parameters had defined to convective heat exchange criterions . . . 15
Ovchinnikov V.V., Smirnov S.V., Gureeva M.A. Development of the technology of the production of welded needle-shaped bushings for fastening of components from the composite materials . . . 18

Forging and Stamping Productions

Shestakov N.A., Subich V.N., Demin V.A. Pressing of tubes made of noncompact materials . . . 22
Ilyushkin M.V., Markovtsev V.A., Lazarev I.I. Selection of an optimal punch`s shape, intended to chop the closed profile in dies with the help of computer program ANSYS/LS-DYNA . . . 29

Rolling and Drawing Productions

Fillipov A.A., Pachurin G.V. Manufacturing of gauged bars for cold heading of fixing wares made of steel 38KhA without turning of surface defects . . . 32

Physical Metallurgy and New Materials

Belyakov A.I., Belyakov A.A., Matstsarelli D., Zhukov A.A. Mechanical properties of spheroidal graphite iron with at the elevated temperatures . . . 37
Palavin R.N., Kolganov V.N., Korovin V.A., Leushin I.O., Stepanov P.P., Kirov A.S. Increase of operational durability of cast rollers hot rolling . . . 45

Information

Dovydenkov V.A., Fetisov G.P. Model for calculation of powder-binding compositions viscosity for reception of blanks by their moulding and sintering . . . 47
Industrial exhibitions in February–May 2009 . . . 50
Index of the articles published in journal in year 2008 . . . 52

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", 2009

УДК 621.746.047

В.М. Сенопальников *(ООО "Проммет", г. Нижний Новгород),*
В.Л. Сивков *(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева)*

Механизм образования осевой неоднородности в непрерывном слитке

В рамках теории объемно-последовательного затвердевания рассмотрен механизм образования осевой V-образной неоднородности в непрерывном слитке. При этом учитывается перенос изолированных кристаллов под действием сил, возникающих в двухфазной зоне при наличии градиента скорости по сечению нисходящего потока. Особенности строения осевой зоны слитка объясняются различной по его высоте интенсивностью переноса изолированных кристаллов к фронту затвердевания.

The paper adresses the mechanism of the axial V-shaped heterogeneity formation in continuous ingot within the framework of the theory of volumetric progressive solidification; being taken into consideration is the transfer of isolated crystals due to the action of forces that arise in the two-phase zone at availability of the velocity gradient across the down-flow's cross section. Structural peculiarities of the ingot axial zone are explained by different (as for the ingot's height) intesity of the isolated crystal's transfer to the solidification front.

Ключевые слова: осевая зона; неоднородность; изолированный кристалл; "мост"; динамическое давление; двухфазный поток.

Key words: axial zone; heterogeneity; isolated crystal; "bridge"; dynamic pressure; two-phase flow.

Осевая пористость и связанная с ней V-образная неоднородность являются наиболее трудноустранимыми дефектами непрерывно-литой заготовки. Периодически повторяющиеся по всей длине центральной части "мосты" разделяют ее на отрезки со строением, характерным для слитков, отливаемых в изложницы (мини-слитки) [1].

Под "мостом" образуются усадочные и ликвационные V-образные дефекты, далее – зона плотного металла, в нижней части которой находится область отрицательной ликвации. Схема образования последней за счет оседания изолированных кристаллов, зародившихся в вышележащих объемах и более чистых по примесям, не вызывает разногласий исследователей. В то же время представление о формировании "мостов" на выступающих на фронте затвердевания столбчатых кристаллах весьма спорно, так как не приводятся убедительные причины нарушения равномерности продвижения твердожидкой фазы.

В рамках теории объемно-последовательной кристаллизации с учетом массопереноса в подвижной жидкотвердой зоне механизм образования "мостов" и периодичность их возникновения могут быть объяснены следующим образом.

Непрерывно-литые заготовки характеризуются значительной протяженностью жидкой и жидкотвердой областей. Движение расплава в головной части слитка зависит от метода подвода его в кристаллизатор. В нижележащих объемах, где динамическое влияние струй подводимого металла ослабевает, развивается термогравитационная конвекция расплава. Нисходящий вдоль фронта затвердевания поток по высоте слитка неоднороден.

В верхней части за счет высокого градиента температур скорости течения жидкости максимальны. По мере удаления от кристаллизатора твердая корка утолщается вследствие роста столбчатых кристаллов, перегрев металла и градиент температуры в нем снижаются. Соответственно скорость нисходящего потока жидкости здесь уменьшается и, в силу неразрывности, происходит его расширение.

В нижней части слитка перед фронтом затвердевания появляются изолированные кристаллы. Погружаясь в нисходящем конвективном потоке, кристаллы растут, а их количество увеличивается. В этой области нисходящий вдоль фронта затвердевания поток становится двухфазным и ускоряющимся. В придонных

объемах незатвердевшей лунки, перед поворотом, нисходящий поток вновь тормозится.

Наряду с погружением в расплав, изолированные кристаллы движутся в направлении поверхности охлаждения под действием усадочных перемещений жидкости, определяемых зависимостью:

$$F_{\text{ус}} = -\int_0^V \text{grad}P_{\text{ус.х}}\,dV, \;\; \text{grad}P_{\text{ус.х}} = \gamma\omega_x\,d\omega_x/dx,$$

где $P_{\text{ус.х}}$ – давление на изолированный кристалл вследствие усадочных перемещений жидкости к фронту затвердевания; γ и ω_x – плотность жидкости и скорость усадочных перемещений жидкости; V – объем кристалла.

Вследствие наличия градиента скорости по ширине двухфазного потока (нулевые скорости на фронте твердой фазы и границе раздела нисходящего и восходящего потоков, максимум скоростей – в зоне максимальной плотности изолированных кристаллов, рис. 1) на изолированные кристаллы действуют также силы динамического давления со стороны жидкости, направленные нормально оси слитка:

$$F_D = -\int_0^V \text{grad}P_{\text{д}}\,dV, \;\; \text{grad}P_{\text{д}} = \gamma\acute{\omega}_y\,d\acute{\omega}_y/dx,$$

где $P_{\text{д}}$ – динамическое давление жидкости на изолированный кристалл; $\acute{\omega}_y$ – скорость погружения кристалла относительно жидкости в потоке.

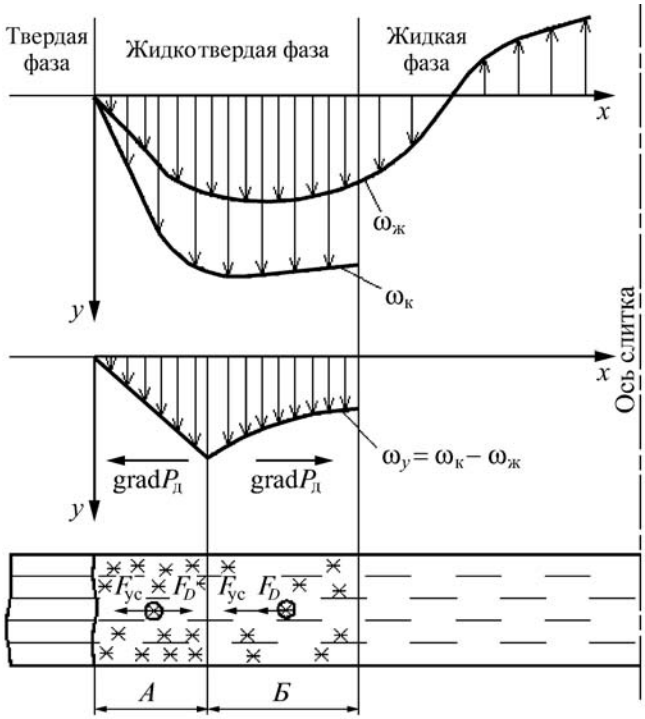


Рис. 1. Эпюры скоростей в двухфазном потоке и направление сил, действующих на изолированные кристаллы

Силы динамического давления на изолированные кристаллы со стороны нисходящего потока в пристенной области направлены противоположно усадочным перемещениям жидкости и препятствуют переносу кристаллов к фронту твердой фазы (рис. 1, зона *А*). На некотором удалении от поверхности последнего эти силы однонаправлены (рис. 1, зона *Б*).

Минимальное развитие зона *А* имеет при наименьших скоростях двухфазного потока, т.е. в точках его начала и поворота. Таким образом, именно здесь создаются условия для ускоренного переноса изолированных кристаллов к фронту затвердевания и образования выступов на границе раздела твердожидкой и жидкотвердой областей (рис. 2).

В окрестности зарождающегося на фронте затвердевания выступа двухфазный поток отклоняется к оси слитка и тормозится. Перенос изолированных кристаллов к фронту твердой фазы интенсифицируется, начинается формирование первичного "моста". После образования первого выступа и в течение его роста до величины, позволяющей двухфазному потоку обтекать его, фронт кристаллизации в вышележащих объемах продвигается равномерно.

В момент замыкания двухфазного потока над "мостом" происходит резкое уменьшение его скорости выше первичного "моста", так как отсекается его наиболее насыщенная изолированными кристаллами ("ускоряющая") часть. В верхней части жидкотвердой зоны создаются благоприятные условия для образова-

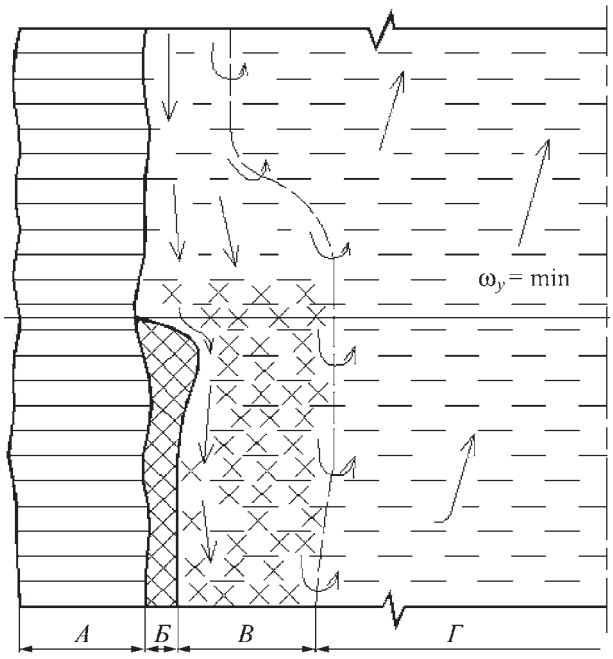


Рис. 2. Схема формирования выступа на фронте затвердевания:

А – зона столбчатых кристаллов; *Б* – зона разноориентированных кристаллов; *В* – нисходящий двухфазный поток; *Г* – восходящий поток расплава

ния нового выступа и формирования очередного первичного "моста".

После поворота двухфазного потока над первичным "мостом" под ним образуется объем с замкнутой циркуляцией расплава. В нижней части этого объема ускоренному продвижению фронта затвердевания, наряду с усадочными перемещениями, способствует осаждение кристаллов, а в верхней части происходит смыкание вертикальных фронтов и опускание мениска металла вследствие усадки.

На мениске расплава и вблизи него (скорости жидкости в вертикальном направлении равны нулю и минимальны) создаются наиболее благоприятные условия для присоединения изолированных кристаллов к фронту твердой фазы. Начинается формирование вторичного выступа. При этом одновременное опускание уровня расплава и продвижение твердожидкой области образуют конусообразную поверхность затвердевания – начинает формироваться усадочная раковина.

Вторичный "мост" смыкается. Мениск расплава под ним опускается и процесс образования выступа и усадочной раковины повторяется. Разрежение в усадочных пустотах вызывает приток в них обогащенного ликватами расплава из прилежащих объемов твердожидкой области. Раковины частично заполняются, а вокруг них образуется рассредоточенная пористость. Эти процессы фиксируются в макроструктуре слитка как V-образный "рисунок". Образование вторичных "мостов" может неоднократно повторяться до полного затвердевания замкнутого объема. Однако если мениск металла в незатвердевшей области опускается быстрее, чем происходит смыкание вертикальных фронтов, под первичным "мостом" образуется протяженная усадочная раковина.

Толщина вторичных "мостов" значительно меньше, чем первичных, поскольку в их образовании практически не участвуют оседающие кристаллы.

Предложенный механизм позволяет объяснить особенности строения осевой зоны непрерывного слитка за счет различной по высоте жидкотвердой области интенсивности переноса изолированных кристаллов к фронту затвердевания.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Непрерывное** литье стали: пер. с англ. М.: Металлургия, 1982. 475 с.

Валерий Михайлович Сенопальников, канд. техн. наук;
Владимир Лаврентьевич Сивков, д-р техн. наук

УДК 621

С.А. Питкя, В.В. Марков *(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева)*

Повышение эффективности рафинирования сплавов фильтрованием

Приведены различные конструкции фильтрующих устройств и способы подачи на них расплава, повышающие эффективность рафинирования расплавов.

Different designs of filtering devices and methods of supply on them melt, finishing of melts increasing efficiency are resulted.

Ключевые слова: пластинчатый фильтр; гидравлический напор; самоочистка; адсорбция; металлический сплав.

Key words: plate-type filter; hydraulic pressure head; self-cleaning; adsorption; metal alloy.

Для фильтрации металлических расплавов применяют различные типы фильтров: сетчатые, зернистые, жидкостные. Однако наряду с преимуществами фильтры имеют недостатки.

Сетчатые фильтры задерживают только крупные неметаллические включения, превышающие размер ячейки. При этом они быстро засоряются.

Зернистые фильтры задерживают крупные неметаллические включения механическим путем и мелкие вследствие их адсорбции поверхностью зерен. Однако у них малая скорость фильтрации, вызванная большим гидравлическим сопротивлением фильтров. Кроме того, зернистые фильтры обладают большой теплоемкостью, что вызывает захолаживание расплава при фильтрации.

Жидкостные фильтры требуют специальных печей для плавки солей, а также устройств для дробления фильтруемого металла на отдельные струи.

Все перечисленные выше фильтры имеют один общий недостаток – невозможность их многоразового использования.

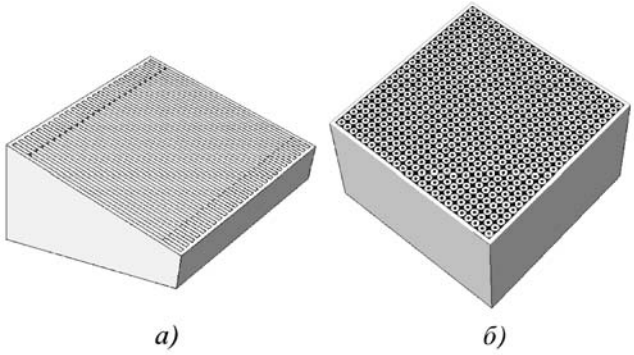


Рис. 1. Фильтры:
а – щелевой пластинчатый; *б* – трубчатый

Эти недостатки в значительной мере устраняются при применении щелевых пластинчатых фильтров [1] и трубчатых фильтров (рис. 1).

Щелевой пластинчатый фильтр (см. рис. 1, *а*) состоит из корпуса, в котором установлены тонкие пластины. Размер щелей между пластинами определяет размер неметаллических включений, механически задерживаемых фильтром. Верхняя часть пластин имеет уклон, благодаря которому неметаллические включения, задерживаемые фильтром, скатываются, предотвращая засорение фильтра. Пластины могут быть изготовлены из металла для легких сплавов или из любой керамики.

Для увеличения адгезионной способности на поверхности пластин можно наносить различные покрытия. После использования фильтра покрытия удаляются с поверхности пластин вместе с адсорбированными неметаллическими включениями, что позволяет использовать фильтр многократно.

Кроме того, можно изготовлять керамические щелевые фильтрующие вставки, щели в которых получаются с помощью металлических каркасов, а прочность вставкам придается обжигом. Такие вставки размещаются внутри формы в литниковой системе.

Несложные расчеты показали, что суммарная поверхность пластин значительно больше суммарной поверхности зерен зернистого фильтра при равенстве объемов фильтров и размеров фильтрующих каналов. При этом суммарная площадь фильтрационных каналов щелевого фильтра намного превосходит таковую аналогичного зернистого фильтра (рис. 2). Это обеспечивает высокую пропускную способность щелевого фильтра.

Плоские каналы щелевых фильтров оказывают меньшее гидравлическое сопротивление движению расплава, чем цилиндрические каналы зернистых фильтров, что также способствует увеличению пропускной способности. При одинаковой пропускной способности щелевые фильтры по размерам много меньше аналогичных зернистых.

Щелевой фильтр имеет еще одно важное преимущество. У зернистого фильтра большая часть его объема приходится на зерна. Чтобы предотвратить захолаживание фильтруемого металла из-за тепловых потерь на нагрев этих зерен, зернистые фильтры перед применением обязательно подогревают. В щелевых фильтрах суммарный объем пластин занимает лишь незначительную часть в общем объеме фильтра. Следовательно, тепловые потери при фильтрации незначительны, что позволяет исключить предварительный подогрев фильтра. Для увеличения адгезионной поверхности фильтра пластины можно сделать гофрированными. Это позволит значительно повысить эффективность рафинирования.

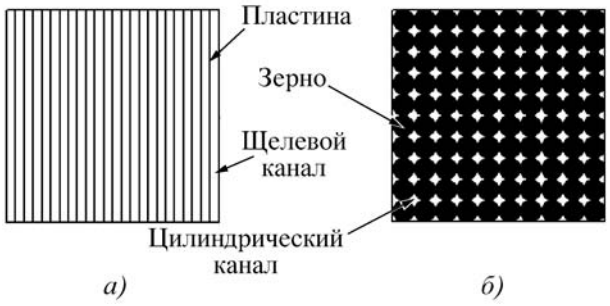


Рис. 2. Пропускная способность фильтров:
а – щелевой фильтр; *б* – зернистый фильтр

Трубчатый фильтр представляет собой коробчатый корпус, в котором установлен фильтрующий элемент в виде вертикально расположенных плотных керамических трубок, плотно прилегающих друг к другу так, что у каждой трубки четыре соседние трубки. Каналы между трубками и отверстия в трубках должны быть примерно равны.

Работа фильтра заключается в том, что металл проходит через фильтр и попадает в форму, а неметаллические включения прилипают к внутренним и наружным поверхностям трубок. Площадь фильтрации и адгезионная поверхность трубчатого фильтра также значительно больше, чем зернистого за счет каналов внутри трубчатых элементов, что подтверждают несложные расчеты и рис. 3.

В качестве материала трубчатых элементов используют составы с содержанием оксидов, имеющих высокие температуры плавления, таких как Al_2O_3, MgO,

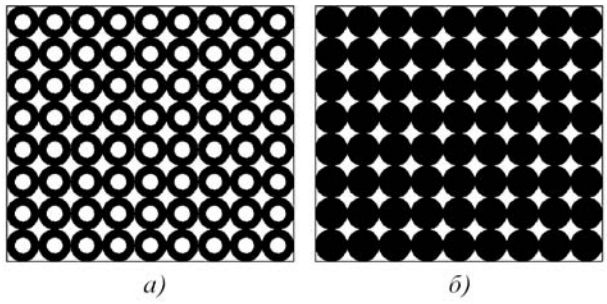


Рис. 3. Пропускная способность фильтров:
а – трубчатый фильтр; *б* – зернистый фильтр

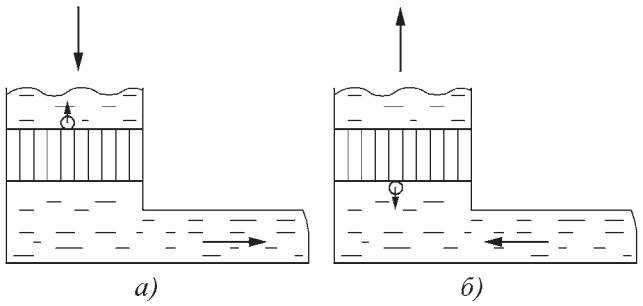


Рис. 4. Фильтрация при верхней (*а*) и нижней (*б*) подаче металла на фильтр

Zr_2O. Составы с содержанием этих оксидов обеспечивают наиболее эффективную адгезионную фильтрацию.

Эффективность работы фильтра зависит не только от самого фильтра, но и от того, как поступает металл на фильтр.

Общепринятым является подача металла на фильтр сверху независимо от фильтруемого сплава и вида неметаллических включений в нем. При этом неметаллическая частица в расплаве будет вести себя по-разному в зависимости от плотности расплава и плотности частицы. Если плотность частицы меньше плотности расплава, то она будет всплывать в расплаве и как бы отрываться от поверхности фильтра. Если плотность частицы больше плотности расплава, то она будет опускаться вниз и прижиматься к поверхности фильтра (Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М., 1970). В первом случае фильтр будет самоочищаться, во втором случае – ускоренно засоряться. В связи с этим расплавы первого типа следует подавать на фильтр сверху (рис. 4, *а*), а расплавы второго типа – снизу, т.е. сифоном (рис. 4, *б*).

Таким образом, для повышения эффективности рафинирования жидких сплавов следует применять прогрессивные конструкции фильтров, а также различные технологические приемы подачи металла на фильтр.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Марков В.В., Питкя С.А.** Наклонный щелевой пластинчатый фильтр для металлических расплавов // Литейное производство. 2006. № 10. С. 9–10.

Сергей Александрович Питкя, инженер;
Владимир Васильевич Марков, д-р техн. наук

В.А. Чайкин *(Филиал МГОУ, г. Сафоново),* **Н.В. Чайкина** *(МГТУ им. Н.Э. Баумана)*

Сравнительный анализ высокопрочных чугунов, полученных модифицированием в ковше и в форме

Показано, что для получения высокопрочного чугуна марки ВЧ 40 без термической обработки предпочтительно модифицирование чугуна в форме. Параллельное производство серого и высокопрочного чугунов способствует увеличению механических свойств серого чугуна и уменьшению склонности его к отбелу за счет улучшения наследственности расплава возвратом ЧШГ.

It is shown the high-test cast iron GGG40 is easier to produce using mold inoculation. Due to parallel production of grey and high-test cast irons and impovement of alloy's heredity with the return of ductile iron, mechanical properties of grey iron is higher, inclination to chill is lower.

Ключевые слова: модифицирование; высокопрочный чугун; микроструктура; внутриформенное модифицирование.

Key words: inoculation; high-test cast iron; microstructure; mold inoculation.

Постановка и анализ проблемы. Прогресс литейного производства неразрывно связан с производством заготовок из конструкционных материалов, обеспечивающих значительный рост надежности и долговечности продукции машиностроения. Таким перспективным материалом является высокопрочный чугун с шаровидным графитом (ЧШГ), имеющий ряд преимуществ перед другими традиционно применяемыми сплавами. Поэтому расширению выпуска ЧШГ уделяется большое внимание. Один из путей быстрого увеличения производства с минимальными капитальными затратами – наладить выпуск ЧШГ в действующих литейных цехах.

Большую потребность испытывают машиностроение и другие отрасли народного хозяйства в высокопластичном чугуне марки ВЧ 40 с относительным удлинением не менее 15 %. Для обеспечения этого требования структура чугуна должна быть ферритной либо содержать не более 20 % перлита.

Из ВЧ 40 изготовляют отливки ходовой части автомобилей, такие как ступицы, чашки дифференциа-

лов, корпусы мостов и т.д., а также монорегуляторы и анкеры промежуточного рельсового скрепления АРС-4, предназначенные для прикрепления подошвы рельса к шпалам на железных дорогах.

Следует отметить, что производство вышеуказанных отливок пытаются освоить многие заводы. Однако успешно справляются с поставленной задачей заводы, производящие ВЧ 40 модифицированием в литейной форме без термической обработки. При использовании других способов возникают трудности. В данной работе проведен анализ причин вышеуказанного.

Цель работы – сравнительный анализ высокопрочных чугунов, полученных широко применяемыми способами модифицирования в ковше и в форме, а также выбор оптимального варианта для стабильного получения чугуна марки ВЧ 40 и изучение влияния наследственности возврата ЧШГ на свойства отливок из серого чугуна (СЧ).

Результаты исследований и обсуждение. Из многих широко распространенных в практике литейного производства способов получения ЧШГ были рассмотрены процессы внутриформенного модифицирования и модифицирования в ковше с крышкой. Первый способ легко вписывается в технологический процесс производства отливок из серого чугуна, не требуя дополнительных капитальных затрат, не ухудшая при этом экологию литейных цехов и обеспечивая усвоение до 80 % магния.

Модифицирование в ковше с крышкой – также удобный, эффективный и надежный процесс с хорошими технико-экономическими показателями. Капитальные и эксплуатационные затраты обычно намного ниже, чем в большинстве других промышленных процессов модифицирования. Наличие крышки позволяет предотвратить горение магния, снижает выделение дыма, устраняет разбрызгивание металла и обеспечивает минимальные потери температуры и углерода.

Модифицирование в первом случае проводили на Ярцевском заводе "Двигатель" (ЯЗД) в действующем цехе, выпускающем СЧ. При этом использовали магнийсодержащую лигатуру ФСМГ-7 фракцией 1...5 мм в количестве 1,4...1,6 %, которую помещали в специальную реакционную камеру внутри литейной формы. При заливке формы чугуном расплав растворяет лигатуру и насыщается магнием. Плавку чугуна производили дуплекс-процессом. Первичный чугун получали в индукционной тигельной печи промышленной частоты емкостью 60 т. В качестве вторичных агрегатов для выдержки и перегрева расплава до 1480...1500 °С использовали индукционный миксер емкостью 40 т. Шихтовыми материалами служили передельный чугун, стальной лом, возврат собственного производства, ферромарганец ФМн78, ферросилиций ФС75.

Сфероидизирующее модифицирование расплава во втором случае провели на Минском тракторном заводе (МТЗ) в установке "ковш-крышка" емкостью 1 т при температуре 1500 °С модификатором ФСМГ7,5 фракцией 1...8 мм в количестве 2 %. Высокопрочный чугун разливали ковшами емкостью 350 кг, при заполнении которых на одну треть производили графитизирующее модифицирование с помощью мерных дозаторов комплексным модификатором с барием и цирконием ФС65 в количестве 0,4 % от массы металла. Плавку чугуна вели в сталелитейном цехе в электропечах ДСП-6 с кислой футеровкой. В качестве шихтовых материалов также использовали передельный чугун, стальной лом, возврат собственного производства, те же ферросплавы.

В обоих случаях для определения механических свойств, химического состава и микроструктуры чугунов заливали приливные клиновидные технологические пробы (клинья располагали в литейной форме и заливали вместе с отливками), из которых изготавливали образцы. Для их исследований кроме лабораторного анализа использовали методы математической статистики и регрессионного анализа. Вычисления проводили на ПЭВМ с применением программы STATISTICS & ANALISIS 6.0.

Изучали механические свойства и однородность ЧШГ. Основные показатели приведены в табл. 1 и на гистограммах (рис. 1–3). Выявлено, что чугуны, полученные двумя способами, имеют высокие показатели стабильности всех механических свойств. Вместе с

1. Статистические исследования механических свойств

Предприятие	Механические свойства	Среднее значение	Минимум	Максимум	Среднеквадратичное отклонение	Несмещенная дисперсия	Коэффициент вариации, %
ЯЗД	$\sigma_в$, МПа	484,7	355	595	46,54	2166	9,6
	НВ	163,3	128	192	12,3	151,27	7,5
	δ, %	14,09	3,05	20,0	3,14	9,85	22,2
МТЗ	$\sigma_в$, МПа	622,7	470	760	43,12	1859	6,89
	НВ	203	187	229	10,17	103,6	5,01
	δ, %	10,26	2,0	13,5	1,94	3,85	19,1

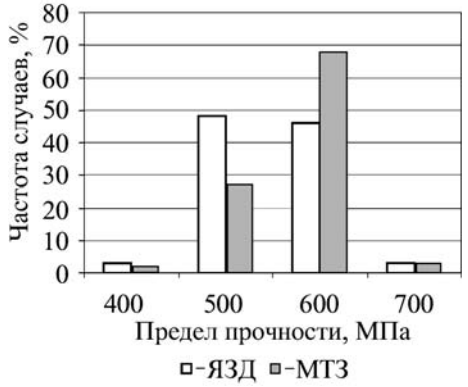


Рис. 1. Гистограмма предела прочности чугунов

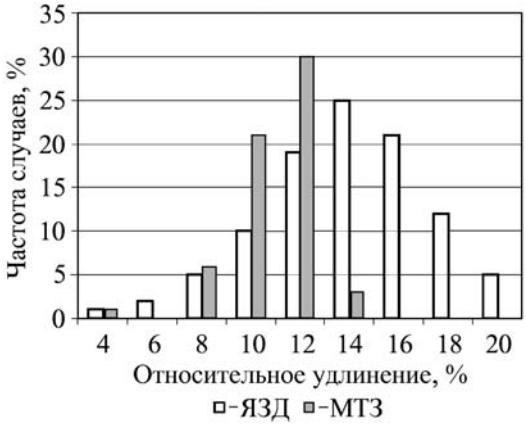


Рис. 2. Гистограмма относительного удлинения чугунов

тем, чугуны, полученные модифицированием в форме, обладают более низкой прочностью и твердостью, но высокой пластичностью. Их механические свойства соответствуют марке чугуна ВЧ 40. Модифицированием в ковше получены чугуны марки ВЧ 60.

Так как на механические свойства чугунов значительно влияет химический состав, на следующем этапе изучили этот показатель. Полученные данные приведены в табл. 2. Как видно, средние значения концентрации углерода, оказывающего существенное влияние на свойства ЧШГ, близки между собой. Содержание кремния в чугунах ЯЗД несколько выше, чем на МТЗ, а марганца – ниже, что способствует увеличению пластичности ЧШГ, однако повышенное со-

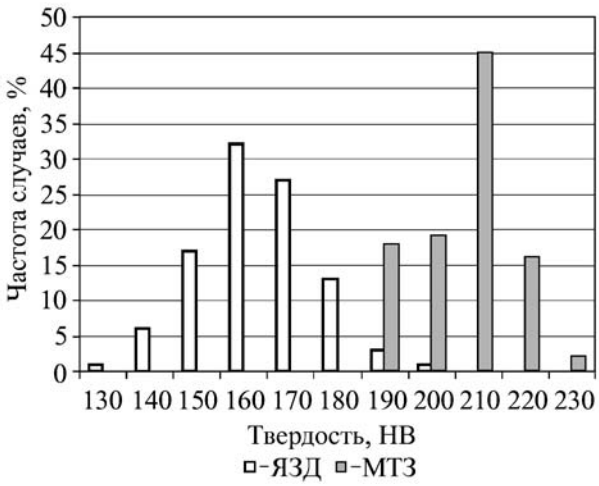


Рис. 3. Гистограмма твердости чугунов

держание хрома в чугунах ЯЗД компенсирует графитизирующее влияние первых двух элементов. Следовательно, химический состав не мог вызвать наблюдаемую большую разницу в механических свойствах чугунов.

Следует отметить, что химический состав чугунов на МТЗ более стабилен. Это связано с тем, что на ЯЗД плавки СЧ и ЧШГ вели в одной плавильной печи, а выдержку и перегрев расплавов осуществляли в разных миксерах. Возврат СЧ и ЧШГ при плавке не разделяли. Поэтому обеспечить однородность химического состава в таких условиях достаточно сложно, и механические свойства ЧШГ, полученных модифицированием в форме, оказались менее стабильными, чем при модифицировании в ковше. Однако однородность механических свойств ЧШГ на ЯЗД существенно выше однородности химического состава. Следовательно, модифицированный в форме чугун менее чувствителен к колебаниям химического состава. Для дальнейших исследований важно установить взаимосвязь между механическими свойствами и химическим составом ЧШГ.

С помощью регрессионного анализа найдены адекватные уравнения регрессии для чугуна, полученного модифицированием в форме. Адекватность моделей проверяли с помощью анализа остатков, который показал, что последовательные остатки независимы

2. Результаты статистической обработки химического состава (% мас.) чугунов

Показатели статистики	C	Si	Mn	Cr	S	P	Mg
Среднее значение	3,59/3,6	2,76/2,43	0,32/0,53	0,14/0,032	0,024/0,01	0,047/0,03	0,089/0,06
Минимум	3,32/3,3	1,84/2,15	0,2/0,48	0,053/0,2	0,01/0,01	0,022/0,03	0,027/0,038
Максимум	4,0/3,83	3,11/2,65	0,48/0,63	0,02/0,08	0,04/0,02	0,09/0,05	0,10/0,078
Коэффициент вариации, %	5,57/3,3	15,2/4,77	19,3/5,38	21,8/25,9	31,38/12,4	21,0/9,1	33,7/15,0

* В числителе показатели, полученные на ЯЗД, в знаменателе – на МТЗ.

3. Механические свойства чугуна, полученного модифицированием в форме

Предприятие	Расчетные данные			Практические значения		
	$\sigma_в$, МПа	δ, %	НВ	$\sigma_в$, МПа	δ, %	НВ
ЯЗД	484,6	14,1	162,5	484,7	14,09	163,3
МТЗ	484,3	14,2	163,8	622,7	10,26	203

между собой, имеют нормальный закон распределения с нулевым математическим ожиданием и постоянной дисперсией. Множественный коэффициент корреляции, равный 0,76, свидетельствует о высокой тесноте связей между переменными.

Уравнения имеют вид:

$$\sigma_в = 442 - 39C + 4{,}7Si + 256{,}2Mn + 328{,}16Cr + \\ + 339{,}8P - 474{,}03S + 405{,}92Mg;$$

$$\delta = 7{,}75 + 2{,}21C + 1{,}43Si - 8{,}63Mn - 22{,}46Cr + \\ + 16{,}86P - 62{,}23S + 12{,}04Mg;$$

$$HB = 131{,}01 - 5{,}12C + 0{,}43Si + 82{,}26Mn + 120{,}21Cr + \\ + 30{,}69P + 161{,}2S + 7{,}84Mg.$$

Вычисленные с помощью полученных уравнений значения механических свойств приведены в табл. 3.

Далее с помощью регрессионного анализа найдены адекватные уравнения регрессии для чугуна, полученного модифицированием в ковше. Множественный коэффициент корреляции, равный 0,79, также свидетельствует о высокой тесноте связей между переменными.

Уравнения имеют вид:

$$\sigma_в = 724{,}3 + 34{,}75C - 111{,}04Si - 61{,}97Mn + 905{,}475Cr + \\ + 587{,}47P - 3441{,}87S + 1240{,}99Mg;$$

$$\delta = 7{,}24 - 1{,}43C + 5{,}06Si - 1{,}93Mn - 32{,}1Cr - \\ - 53{,}45P + 130{,}71S - 30{,}24Mg;$$

$$HB = 207{,}28 + 3{,}84C - 27{,}184Si + 31{,}738Mn + 209{,}5Cr + \\ + 587{,}722P - 548{,}946S + 202{,}2Mg.$$

Вычисленные с помощью полученных уравнений значения механических свойств приведены в табл. 4.

Найденные уравнения регрессии рассчитаны в пределах колебаний химического состава и механических свойств, встречающихся на заводах (см. табл. 1, 2), и применимы для расчетов в данном конкретном случае. Анализ расчетных данных показывает, что чугуны, полученные двумя способами, должны мало отличаться по механическим свойствам. Вместе с тем, как указывалось ранее, модифицирование в ковше дало чугун марки ВЧ 60 с содержанием 45...60 % перлита в структуре, тогда как модифицирование в форме –

4. Механические свойства чугуна, полученного модифицированием в ковше

Предприятие	Расчетные данные			Практические значения		
	$\sigma_в$, МПа	δ, %	НВ	$\sigma_в$, МПа	δ, %	НВ
ЯЗД	718,1	12,3	218,9	484,7	14,09	163,3
МТЗ	623,44	10,2	202,1	622,7	10,26	203

5. Характеристика графита в чугуне

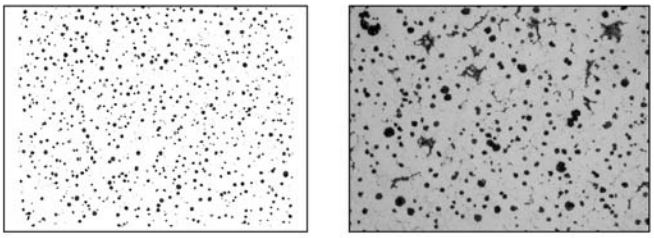
Способ модифицирования	Доля свободного углерода, %	Средний размер включений графита, мкм	Расстояние между включениями графита, мкм	Площадь поверхности графита, мкм^2	Содержание перлита, %
В ковше	15,79	27,7	110,4	373,69	52
В форме	19,07	9,613	65,2	110,84	12

ВЧ 40 с 6...10 % перлита. Для выяснения причины расхождений изучили микроструктуру чугунов, полученных различными способами. Характерные микроструктуры ЧШГ приведены на рис. 4, 5.

Как видно из фотографий, при внутриформенном модифицировании количество свободного графита больше, а размеры включений и расстояние между ними значительно меньше.

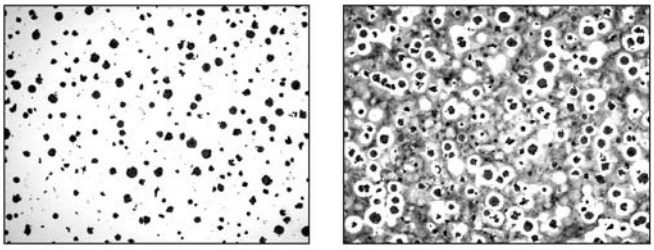
Для более детального изучения микроструктуры использовали микроскоп МИМ 7 в комплекте с цифровой видеокамерой Mintron и компьютерной программой AutoScan Objects 2.00. Результаты исследований приведены в табл. 5.

Анализ показывает, что при внутриформенном модифицировании количество включений графита больше, а размеры включений и расстояние между ними значительно меньше. Это объясняется тем, что при позднем модифицировании в форме создаются наиболее оптимальные условия для образования и



а) *б)*

Рис. 4. Микроструктура ЧШГ, полученного модифицированием в форме (×100):
а – без травления. ШГф5 – ШГд25 – ШГр1 – ШГ12; *б* – травление, ниталь. П6 (Ф92)



а) *б)*

Рис. 5. Микроструктура ЧШГ, полученного модифицированием в ковше (×100):
а – без травления. ШГф4 – ШГд 45 – ШГр1 – ШГ6; *б* – травление, ниталь. П55 (Ф45)

сфероидизации включений графита. В данном случае в отливке присутствует множество зон с термической и химической неоднородностью, создающих существенный инокулирующий эффект, практически совпадающий во времени с процессом кристаллизации отливок.

При модифицировании в ковше время между модифицированием и началом кристаллизации отливок значительно больше, что приводит к выравниванию расплава по температуре и химическому составу. В результате количество включений графита существенно снижается. Многие образовавшиеся центры кристаллизации либо исчезают, либо коагулируют, становятся крупнее.

В результате при эвтектоидном превращении у ЧШГ, полученных модифицированием в форме, происходит более существенная ферритизация металлической матрицы, которая обусловлена большой удельной поверхностью графитной фазы и меньшей длиной диффузионного пути углерода. Последний характеризуется расстоянием между соседними включениями графита.

Таким образом, для получения ЧШГ марки ВЧ 40 без термической обработки предпочтительно модифицировать чугун в форме. Несмотря на необходимость 100%-ного контроля отливок и строгого соблюдения технологического процесса (в отличие от ковшевого способа), исключение термической обработки полностью компенсирует этот недостаток.

Особенность производства заготовок из высокопрочного чугуна марки ВЧ 40 для ходовой системы двигателей автомобиля на ЯЗД АМО "ЗИЛ" заключается в том, что их получали в действующем цехе по выпуску серого чугуна. Серый и исходный для получения ЧШГ чугуны выплавляли дуплекс-процессом в индукционной печи с последующей выдержкой в индукционном канальном миксере. Возврат при плавке чугунов не разделяли. Отмечена особенность совместного производства СЧ и ЧШГ.

После резкого повышения объема производства отливок из ЧШГ, связанного с началом выпуска малотоннажного автомобиля ЗИЛ 53011, было замечено, что механические свойства СЧ начали повышаться, а проблем с отбелом в отливках из СЧ стало меньше без принятия дополнительных мер. Для объяснения причин провели статистическую обработку механических свойств и химического состава СЧ до и после увеличения объема производства ЧШГ. Результаты приведены в табл. 6.

Как видно, после увеличения объемов производства ЧШГ предел прочности при растяжении СЧ вырос на 5,4 % при несущественном изменении химического состава. Твердость при этом повысилась лишь на 2 %. Механические свойства и химический состав СЧ стали значительно однороднее. Это связано с влиянием на расплав СЧ наследственности возврата ЧШГ,

6. Результаты статистической обработки

Показатели	Среднее значение	Размах колебаний	Среднеквадратичное отклонение	Дисперсия	Коэффициент вариации, %
Механические свойства:					
предел прочности, МПа	240,7 / 253,9	130 / 80	25,51 / 17,36	652,02 / 301,44	10,59 / 6,8
твердость, НВ	188 / 192	144 / 44	14,67 / 7,7	215,38 / 59,31	7,8 / 4,0
Химический состав, %:					
углерод	3,38 / 3,37	0,54 / 0,6	0,096 / 0,076	0,009 / 0,006	2,84 / 2,27
кремний	2,18 / 2,16	1,16 / 0,81	0,22 / 0,17	0,049 / 0,029	10,14 / 7,93
марганец	0,35 / 0,38	0,34 / 0,36	0,065 / 0,058	0,0043 / 0,0035	18,43 / 15,32
хром	0,17 / 0,18	0,17 / 0,17	0,024 / 0,026	0,0006 / 0,0007	13,93 / 14,35
фосфор	0,049 / 0,050	0,037 / 0,038	0,0086 / 0,0087	0,0001 / 0,0001	17,41 / 17,26
сера	0,026 / 0,027	0,061 / 0,019	0,0064 / 0,0030	0,0000 / 0,0000	24,19 / 11,24

*В числителе приведены результаты до увеличения объемов производства, в знаменателе – после него.

содержащего много углерода и кремния. Это вызвало необходимость уменьшения количества графита и ферросилиция в завалке СЧ, что в свою очередь снизило ошибки дозировки.

Магний, присутствующий в возврате ЧШГ, связывает серу и стабилизирует ее содержание в расплаве, а большое количество мелких глобулей графита способствует увеличению количества графитных включений и их измельчению в СЧ. Кроме того, это вызывало также измельчение зерен эвтектического аустенита и, как следствие, диспергирование перлита в СЧ. В результате повышены механические свойства, уменьшена склонность к отбелу СЧ. Положительный момент в данной ситуации – умеренный рост твердости.

Выводы

• Для получения ЧШГ марки ВЧ 40 без термической обработки предпочтительно модифицирование чугуна в форме. Позднее модифицирование создает существенный инокулирующий эффект, практически совпадающий во времени с процессом кристаллизации отливок. В результате при внутриформенном модифицировании количество включений графита больше, а расстояние между ними значительно меньше. При эвтектоидном превращении у ЧШГ происходит более существенная ферритизация металлической матрицы, которая обусловлена меньшей длиной диффузионного пути углерода.

• Параллельное производство СЧ и ЧШГ способствует повышению механических свойств СЧ и уменьшению склонности его к отбелу в результате улучшения наследственности СЧ возвратом ЧШГ.

Владимир Андреевич Чайкин, канд. техн. наук;
Наталья Владимировна Чайкина, преподаватель

УДК 621.74

И.О. Леушин, С.В. Беляев, И.С. Крюкова *(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева),*
И.В. Казакова *(ОАО "Сормовская Кузница", г. Нижний Новгород)*

Противопригарные покрытия на основе отходов гальванического производства для стальных отливок

Рассмотрен вариант применения отходов гальванического производства в составе противопригарных покрытий для изготовления стальных отливок. Приведены составы и технология получения противопригарных покрытий.

The application variant of waste products of galvanic manufacture in structure antipenetration wash for production steel casting is considered. Structures and technology of reception antipenetration wash are resulted.

Ключевые слова: противопригарное покрытие; отходы гальванического производства; стальное литье; реакции восстановления; легкоудаляемая корка пригара; термодинамические предпосылки.

Key words: antipenetration wash; galvanic waste products; steel casting; regeneration; easy remouvable casting skin; thermodynamic prerequisites.

При любом способе очистки сточных вод или технологии нанесения гальванопокрытия неизбежно образуются гальваношламы или иные концентрированные отходы, являющиеся вторичным продуктом очистки гальваностоков.

Гальванический шлам образуется при переработке жидких отходов: сточных и промывных вод, отработанных технологических растворов и электролитов, а также концентратов, образующихся при использовании некоторых методов очистки, таких как ионообменный, электродиализный, обратноосмотический, ультрафильтрационный, сорбционный, экстракционный, метод выпаривания, диафрагменный электролиз.

Шлам представляет собой высококонцентрированные тестообразные суспензии влажностью 75...90 %. Плотность твердой фазы отходов составляет 2,36...2,69 г/см^3. Шлам состоит из смеси труднорастворимых гидроксидов, карбонатов, изредка сульфидов тяжелых цветных металлов, соединений кальция и магния, а также железистых соединений.

Состав шлама не постоянен и зависит от применяемых в гальваническом цехе растворов и используемых на очистных сооружениях химикатов. Диапазон содержания всех элементов достигает нескольких порядков: для меди, цинка, хрома, железа их содержание в шламе колеблется в интервале 0,1...10 %, для свинца и олова – 0,1...1 %, для кадмия и никеля – 0,01...1 %.

Гальванический шлам, содержащий ионы железа и цветных металлов, можно рассматривать, как ценное металлургическое сырье, особенно в условиях обеднения первичных руд.

Основная цель работы – применение отходов гальванического производства в качестве наполнителя противопригарных покрытий.

Основным и активным ингредиентом противопригарного покрытия является наполнитель, определяющий эффективность действия покрытия с точки зрения устранения пригара, эрозии поверхности формы расплавленным металлом и других поверхностных дефектов (металлизация, просечка).

В качестве наполнителей противопригарных покрытий для изготовления форм и стержней при производстве чугунных и стальных отливок широкое применение получили графит, циркон, корунд. Однако они дороги, дефицитны и токсичны. Таким образом, существует проблема замены этих материалов на более дешевые, экологически безопасные, но при этом не уступающие по технологическим показателям.

На процесс образования пригара влияют различные факторы (гранулометрический состав наполнителя, седиментационная устойчивость, характер отверждения покрытия и др.), весь спектр которых невозможно учесть при разработках новых композиций и технологий.

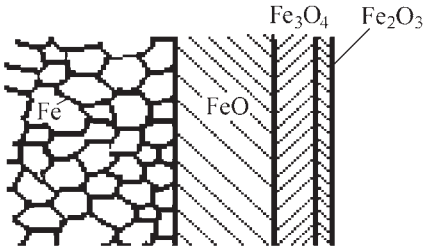
В качестве наполнителей использовали отходы гальванического производства. Применимость данного материала оценивали исследованием его следующих свойств: химический состав покрытия; газопроницаемость; зерновой (гранулометрический) состав; пористость; форма зерна; седиментационная устойчивость; прочность к истиранию. Также исследовали теплофизические свойства и поведение наполнителя противопригарной краски при контакте с жидким металлом. Данного комплекса свойств достаточно чтобы однозначно ответить на вопрос о применимости отходов гальванического производства в качестве наполнителя противопригарных покрытий [1].

Наличие в составе гальваношламов до 60 % Fe_2O_3 также является причиной их применения в качестве наполнителя. Оксид Fe_2O_3 способствует формированию на поверхности стальной отливки толстой корки, состоящей из оксидов железа, которая в результате внутренних напряжений и термической усадки отливки легко отделяется от поверхности отливки.

Так как железо образует несколько оксидов: Fe_2O_3, Fe_3O_4 и FeO, то корка пригара состоит из трех слоев, причем каждый слой растет по собственному закону. Слои четко разграничиваются; самый близкий к форме слой наиболее обогащен кислородом (рисунок).

В общем виде реакции восстановления оксидов твердым углеродом можно представить следующим образом:

$$xMe + \frac{y}{2}O_2 = Me_xO_y, \qquad (1)$$



Многослойное строение корки пригара

$$C + \frac{1}{2}O_2 = CO, \qquad (2)$$

$$\frac{2}{y}Me_xO_y + 2C = \frac{2x}{y}Me + 2CO. \qquad (3)$$

Реакции восстановления оксидов железа твердым углеродом:

$$Fe_2O_3 + \frac{1}{3}C = \frac{2}{3}Fe_3O_4 + \frac{1}{3}CO, \qquad (4)$$

$$Fe_3O_4 + C = 3FeO + CO, \qquad (5)$$

$$FeO + C = Fe + CO. \qquad (6)$$

Содержание каждого оксида в корке пригара определяется внешними параметрами [2].

Исходя из термодинамических расчетов и теоретических предпосылок были разработаны составы противопригарных покрытий для чугунных отливок (табл. 1) и проведены опыты [3]. Для экспериментов со стальными отливками применяли аналогичные составы покрытий.

В состав покрытий № 3, 4, 8, 13 и 14 входит графит, который негативно влияет на качество поверхности стальных отливок, науглероживая ее. Однако для сравнения результатов экспериментов с чугунными и стальными отливками использовали указанные составы покрытий.

Предварительно высушенные и измельченные гальваношламы просеивали через сито 0315. В качестве связующего применяли декстрин. Плотность противопригарного покрытия на водной основе 1,30... 1,32 г/см^3.

Покрытие наносили на форму с помощью кисти. После этого форма подсушивалась при температуре 120 °С в течение 8...10 мин. Температура заливки металла в форму 1540...1560 °С. После заливки и выдержки отливки извлекались. Результаты экспериментов приведены в табл. 2.

Легкоудаляемый химический пригар получили на отливках из углеродистой стали 35Л, формы для которой были покрыты противопригарным покрытием состава № 5. Состав покрытия: 90 % гальваношламы и 10 % связующее. Значительное содержание оксида железа 56 % Fe_2O_3 в составе гальваношламов способ-

1. Составы, % мас., противопригарных покрытий

Номер состава покрытия	Осадок ванн нейтрализации	Отходы ванн		Графит (серебристый)	Связующее (декстрин)	Песок
		травления	фосфатирования			
1	–	–	90	–	10	–
2	–	90	–	–	10	–
3	–	–	77	15	8	–
4	–	77	–	15	8	–
5	–	45	45	–	10	–
6	–	–	45	–	10	45
7	–	45	–	–	10	45
8	–	38,5	38,5	15	10	–
9	90	–	–	–	10	–
10	77	–	15	–	8	–
11	45	45	–	–	10	–
12	45	–	45	–	10	–
13	38,5	38,5	–	15	10	–
14	38,5	–	38,5	15	10	–

2. Результаты экспериментов

Номер состава покрытия по табл. 2	Пригар	Характеристика пригара
1, 2, 4, 6–14	Небольшой	Удаляемый ручным зубилом
3	Малый	
5		Удаляемый металлической щеткой, имеются чистые, без пригара зоны

ствовало образованию легкоудаляемой корки пригара на стальных отливках.

С экономической точки зрения видна существенная выгода при использовании отходов гальванического производства в качестве наполнителя противопригарного покрытия. Предложенная технология позволяет сократить расходы на утилизацию отходов и закупку дорогостоящих материалов на ~40 тыс. руб. при программе выпуска 2000 т годного литья в год. В условиях крупносерийного производства эта сумма невелика, но с экологической точки зрения применение данной технологии позволяет сохранить земли, предназначенные для полигонов техногенных отходов, отказаться от вредных компонентов противопригарных композиций (эфиры, масла, смолы и т.д.).

Выводы

1. При изготовлении стальных отливок по аналогии с чугунными можно получить легкоотделяемый пригар. Для этого в состав противопригарных покрытий необходимо вводить гальваношламы с содержанием оксидов железа до 60 %.

2. Экономическая оценка применения отходов гальванического производства в качестве наполнителя противопригарных покрытий позволяет говорить о целесообразности применения указанных шламов в литейном производстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Крюкова И.С.** Оценка применимости техногенных отходов в литейном производстве / И.С. Крюкова, И.О. Леушин, С.В. Беляев // Современная металлургия начала нового тысячелетия: сб. тр. Ч. 1. Липецк, 2007. С. 162–167.

2. **Васильев В.П.** Аналитическая химия. В 2 кн. Кн. 2. Физико-химические методы анализа: учебник. М.: Дрофа, 2005. 383 с.

3. **Применение** отходов гальванического производства в составе противопригарных красок/ И.О. Леушин, С.В. Беляев, И.С. Крюкова, С.В. Калистов // Заготовительные производства в машиностроении. 2007. № 7. С. 5–7.

Игорь Олегович Леушин, д-р техн. наук;
Сергей Владимирович Беляев, канд. техн. наук;
Ирина Сергеевна Крюкова, инженер;
Ирина Вячеславовна Казакова, гл. металлург

И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, С.П. Мочалов, С.А. Бедарев, В.И. Клопов
(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

Геометрические параметры шахтных печей, определенные по критериям конвективного теплообмена

Приведено теоретическое обоснование известной эмпирической зависимости между высотой и внутренним диаметром печи в виде квадратного корня ($H = 4{,}25Д^{0,5}$) при рассмотрении конвективного теплообмена между теплоносителем и материалом печи на основе теории подобия.

Famous empirical dependences theoretical justification between height and furnaces core diameter as quadratics root law ($H = 4{,}25Д^{0,5}$) at consideration convective heat exchange between heat carrier and furnace material on basis of similarity theory is considered.

Ключевые слова: шахтная печь; конвективный теплообмен.

Key words: blast furnace; convective heat exchange.

При проектировании печей, выходящих по размерам за пределы нормального ряда, приходится использовать рекомендуемые зависимости [1, 2], которые не всегда теоретически подтверждены. В данной статье теоретически обоснована известная эмпирическая зависимость между высотой и внутренним диаметром печи [1].

Металлургические реакции для получения металла с необходимыми свойствами протекают при определенных тепловых режимах. При постоянном давлении в плавильной печи температура процесса отклоняется от номинальных значений на ±(1...2) %.

Геометрические размеры шахтных печей значительно разнятся [1, 3]. Так, у литейных вагранок внутренний диаметр шахты Д = 0,5...2,1 м, полезная высота H = 3...6,5 м; у доменных печей диаметр горна $Д_г$ = = 7,2...15,1 м, полезная высота печи $H_п$ = 26...34,8 м. Хотя геометрические размеры плавильных печей одного ряда изменяются значительно, температурные условия в период плавки должны оставаться постоянными. Для шахтных печей используют степенную зависимость вида [1, 2]

$$H = AД^n, \qquad (1)$$

где A – постоянная для данного типа печи; n = = 0,5...0,6 – показатель степени.

Н.Г. Гиршович высоту литейной вагранки рекомендует рассчитывать по формуле

$$H = 4{,}25Д^{0,5}. \qquad (2)$$

Для доменных печей Н.А. Рамм [3] предлагает эмпирическую зависимость

$$H = 6{,}44V_{пол}^{0,22} = 6{,}44(k'HД_р)^{0,22}, \qquad (3)$$

где $V_{пол}$ – полезный объем печи; $Д_р$ – диаметр распара; k' = 0,53...0,54 – коэффициент, учитывающий отклонение профиля доменной печи от цилиндрического.

Преобразуя (3), получаем зависимость

$$H = (8{,}4...8{,}6)\,Д_р^{0,565}. \qquad (4)$$

В табл. 1 и 2 приведены основные профильные размеры вагранок и доменных печей [4, 5].

По Н.А. Рамму

$$H_г = 1{,}16\sqrt{Д_г}. \qquad (5)$$

Для обоснования зависимостей (2) и (4) рассмотрим условия теплообмена в продуваемом движущемся слое [6] и в шахтных печах [7]. Исследователи отмечают низкие значения коэффициента теплообмена в движущемся слое по сравнению с неподвижным. Последнее связано с особенностями аэродинамики и механики движения слоя, а также с уменьшением эффективности в плохо продуваемых участках и в зоне завершенного теплообмена [$\Delta t = (t_т - t_г) \to 0$], где $t_т$ и $t_г$ – температура твердой шихты и газа. По данным Б.И. Китаева и др., в шахтных печах коэффициент теплообмена в 3–10 раз меньше расчетной величины.

1. Геометрические размеры вагранок открытого типа нормального ряда

Д, м	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,7	1,9	2,1
H, м	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	6,0	6,25	6,5
$\frac{H}{\sqrt{Д}} = A$	4,27	4,2	4,24	4,3	4,32	4,6	4,33	4,5
Примечание. Среднее значение A = 4,34.								

2. Основные размеры профилей доменных печей [3, 4]

$Д_г$, м	7,2	8,2	8,6	9,1	9,75	10,5	11,0	11,6	12,0	14,7	15,1
$H_п$, м	26,0	27,3	28,0	28,5	29,4	30,2	31,2	32,2	32,79	33,5	34,8
$\frac{H_п}{\sqrt{Д_г}} = A$	9,65	9,5	9,5	9,45	9,40	9,38	9,45	9,5	9,6	8,9	8,95
$H_г$, м	3,2	3,2	3,2	3,2	3,6	3,8	3,9	3,9	3,9	4,4	5,7
$\frac{H_г}{\sqrt{Д_г}} = A$	1,14	1,12	1,09	1,06	1,16	1,17	1,17	1,15	1,14	1,15	1,47
$Д_р$, м	26,0	27,3	28,0	28,5	29,4	30,2	31,2	32,2	32,79	33,5	34,8
$\frac{H_п}{Д_р^{0,565}}$	8,4	7,85	7,76	7,75	7,70	7,55	7,75	7,50	7,65	7,0	6,85
Примечание. $H_г$ – высота горна.											

На основе обработки результатов лабораторных и полупромышленных исследований на шахтных печах получена зависимость [8]:

$$\mathrm{Nu}_{сл} = M\mathrm{Re}_{сл}^{0,59}\mathrm{Pr}^{0,33}, \qquad (6)$$

где $\mathrm{Nu}_{сл} = \alpha_{сл}H/\lambda_{сл}$ – критерий Нуссельта; $\alpha_{сл}$ и $\lambda_{сл} = 13\lambda\ln[(0,74 - 0,31\beta)/(0,74 - \beta)]$ – коэффициенты теплообмена и теплопроводности слоя (здесь λ – теплопроводность газового теплоносителя; $\beta = 1 - \varepsilon$ – относительная доля твердой фазы; ε – порозность слоя); H – длина канала или высота шахтной печи; $\mathrm{Re}_{сл} = v_{сл}Д/\nu$ – критерий Рейнольдса; $v_{сл}$ – скорость движения слоя; Д – диаметр канала или шахтной печи; ν – коэффициент кинематической вязкости газового теплоносителя; $\mathrm{Pr} = \nu/a$ – критерий Прандтля; a – коэффициент температуропроводности газа; M – коэффициент пропорциональности, зависящий от температуры (150...1500 °С) и отношения теплоемкостей потоков.

Подставляя в (6) значения критериев Nu, Re, Pr, получаем

$$\frac{\alpha_{сл}H}{\lambda_{сл}} = M\left(\frac{v_{сл}Д}{\nu}\right)^{0,59}\left(\frac{\nu}{a}\right)^{0,33} \qquad (7)$$

или

$$H = \frac{\lambda_{сл}}{\alpha_{сл}}M\left(\frac{v_{сл}}{\nu}\right)^{0,59}\left(\frac{\nu}{a}\right)^{0,33}Д^{0,59}. \qquad (8)$$

Учитывая, что в правой части выражения (8) величины перед $Д^{0,59}$ постоянные, приводим его к виду

$$H = A_1Д^{0,59}, \qquad (9)$$

где $A_1 = \frac{\lambda_{сл}}{\alpha_{сл}}M\left(\frac{v_{сл}}{\nu}\right)^{0,59}\left(\frac{\nu}{a}\right)^{0,33}$.

Рассмотрим экспериментальные данные по теплообмену в плотном гравитационном слое в оребренных каналах, которые описываются критериальным уравнением [9]:

$$\mathrm{Nu} = 2,35\left(\frac{\mathrm{Pe}Д_к}{H_к}\right)^{0,4}, \qquad (10)$$

где $\mathrm{Pe} = vД_к/a$ – критерий Пекле; $H_к$ и $Д_к$ – высота и диаметр канала; v – скорость.

Раскрывая значение критериев подобия в (10), получаем формулу общего типа

$$H = AД^{0,57}, \qquad (11)$$

где $A = \left(2,35\frac{\lambda}{a}\right)^{0,715}\left(\frac{v}{a}\right)^{0,285}$.

Показатели степени при Д в выражениях (9) и (11) соответственно $n = 0,59$ и 0,57. В эмпирической зависимости (4) $n = 0,565$. Следовательно, выражения (9) и (11), полученные обработкой экспериментальных данных в лабораторных и полупромышленных условиях, являются теоретическим обоснованием эмпирических формул М.Г. Гиршовича (2) и Н.А. Рамма (4).

Для вагранoчной плавки высоту, м, коксовой насадки рекомендуется определять по эмпирической формуле [10]:

$$H_к = 0,45 + 0,7Д. \qquad (12)$$

Сравнение данных табл. 3 показывает практически тождественные результаты вычислений по формулам (5) и (12). Так как формула Рамма (5) получила теоретическое обоснование, ей следует отдавать предпочтение при расчете $H_к$ для вагранoчной плавки.

Вывод. Известная эмпирическая зависимость между высотой и внутренним диаметром печи в виде закона квадратного корня теоретически обоснована с помощью теории подобия при рассмотрении конвективного теплообмена между теплоносителем и материалами шихты. Полученные теоретические зависи-

3. Расчетные значения высоты холостой колоши для вагранки по (12) и горна по формуле А.Н. Рамма (5)

Внутренний диаметр вагранки Д, м	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,7	1,9	2,1
$H_к = 0,45 + 0,7Д$	0,80	0,94	1,08	1,22	1,36	1,64	1,78	1,98
$H_г = 1,16Д^{1/2}$	0,82	0,96	1,10	1,22	1,31	1,52	1,60	1,7

мости могут быть рекомендованы для проектирования новых печей, выходящих по размерам за пределы нормального ряда как в меньшую, так и в большую сторону.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гиршович Н.Г.** Чугунное литье. М.: Металлургиздат, 1949. 710 с.
2. **Рамм А.Н.** Современный доменный процесс. М.: Металлургия, 1980. 303 с.
3. **Ефименко Г.Г.** Металлургия чугуна / Г.Г. Ефименко, А.А. Гиммельфарб, В.Е. Левченко. Киев: Вища школа, 1988. 351 с.
4. **Селянин И.Ф., Степанов А.И., Долинский В.А. и др.** Об определении расчетным путем высоты шахтных печей // Изв. вузов. Черная металлургия. 1997. № 2. С. 10–12.
5. **Грачев В.А.** Печи литейных цехов. М.: МГОУ, 1994. 633 с.
6. **Финдлей Р.А., Гойнс.** Системы с твердым теплоносителем // Сб. "Новейшие достижения нефтехимии". Т. II. Гостехиздат, 1961.
7. **Китаев Б.И.** Теплообмен в шахтных печах / Б.И. Китаев, Ю.Г. Ярошенко, В.Д. Сучков. М.: Металлургиздат, 1957. 304 с
8. **Tomas G.T., Reintjes H.** A review of fluid to particle heat transfer in packed and moving beds // Preprint. Nat Heat Transfer Conf. Amer. Inst. Chem. Eng. 1960. № 10.
9. **Горбис З.Р.** Теплообмен и гидродинамика дисперсных сквозных потоков. М.: Энергия, 1970. 424 с.
10. **Селянин И.Ф.** Вагранoчный процесс с оптимальным распределением дутья по высоте зоны горения // И.Ф. Селянин, Г.Л. Маркс. Новокузнецк: Изд-во СибГГМА. 218 с.

Иван Филиппович Селянин, д-р техн. наук;
Андрей Владимирович Феоктистов, канд. техн. наук;
Сергей Павлович Мочалов, д-р техн. наук;
Сергей Александрович Бедарев, инженер;
Виктор Иванович Клопов, главный инженер

Введение в нанотехнику

Головин Ю.И. 2007. – 496 с., тв. пер., 70×100 1/16

ISBN 978-5-217-03378-2

Цена с НДС 495 руб.

Кратко изложены термины, принципы, достижения и перспективы стремительно развивающейся области науки, техники и бизнеса – нанотехники и нанотехнологии. Представлены все важнейшие направления работ в этой сфере.

Параллельно с русской терминологией приведена англоязычная, так как, во-первых, часть терминов сначала появилась в английском языке и не всегда русские термины удачно передают их смысл. Во-вторых, даже английская терминология в области нанонауки не установилась окончательно, а русскоязычная тем более, что требует разъяснений и комментариев.

Пособие имеет целью в общедоступной форме познакомить студентов, аспирантов, инженеров различных специальностей, которые должны заниматься вопросами освоения нанотехнологии и нанотехники в своих предметных областях, с основными идеями и подходами, а также существующими и перспективными разработками в максимально концентрированном виде.

Приобрести книгу можно непосредственно в издательстве "Машиностроение", прислав заявку в отдел реализации по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru; по почте: 107076, Москва, Стромынский пер., 4. ООО "Издательство Машиностроение". Справки по тел. (499) 269-66-00. http://www.mashin.ru

УДК 691:721.75

В.В. Овчинников, С.В. Смирнов, М.А. Гуреева *(ФГУП "Российская самолетостроительная корпорация МиГ", Москва, Московский государственный индустриальный университет)*

Разработка технологии изготовления сварных игольчатых втулок для крепления деталей из композиционных материалов

Исследован процесс локального деформирования листовых заготовок титанового сплава ВТ6С с применением нагрева импульсом тока в электродах машины точечной контактной сварки. Разработана конструкция приспособления для деформирования заготовки и определены параметры процесса (ток импульса, длительность импульса и силы осадки). Анализ микроструктуры материала в исходном состоянии и после деформирования с нагревом не выявил существенных изменений в виде укрупнения зерна или образования альфированного слоя. Приведены результаты исследования процесса сварки иголок с тарелкой по схеме рельефной сварки с рельефом в виде острой кромки заклепки (иголки) с отверстием в тарелке.

The process of the local deformation of the sheet blanks of titanium alloy VT6S with the application of heating by current pulse on the electrodes of the machine of spot resistance welding is investigated. The construction of adaptation for the deformation of billet is developed and the parameters of process are determined (pulse current, the pulse duration and upsetting force). The analysis of the microstructure of material in the initial state and after deformation with the heating did not reveal substantial changes in the form in coarsening or formation of the alpha-deposited layer. The results of investigating the process of welding needles with the plate according to the diagram of projection welding with the relief in the form of the sharp edge of rivet (needle) with the opening in the plate are given.

Ключевые слова: игольчатая втулка; контактная сварка; тарелка; заклепка; параметры режима; титановые сплавы; альфированный слой; макроструктура соединения; кольцевая литая зона; механические испытания сварных соединений.

Key words: needle-shaped bushing; resistance welding; plate; rivet; the parameters of regime; titanium alloys; the alpha-deposited layer; the macrostructure of connection; annular cast zone; mechanical weld tests.

В конструкции современных самолетов локационное оборудование размещается в головной части фюзеляжа в радиопрозрачном конусе из композиционного материала. Для его присоединения к металлическим частям фюзеляжа используют ленту из титановых сплавов, к которой контактной точечной сваркой прикрепляют игольчатые втулки. Последние конструктивно представляют собой тарелки с коническим выступом и рядом иголок (рис. 1, *а*), впрессованных в конус из композиционного материала. В коническом выступе тарелки размещается четвертьоборотный замок, посредством которого радиопрозрачный конус крепится на металлических частях головной части фюзеляжа.

Игольчатые втулки получают методами литья титановых сплавов в металлические формы (кокили), однако при этом высок уровень брака из-за возникновения дефектов в виде пор, рыхлости и трещин в теле иголок.

Дополнительные проблемы возникают в связи с приостановкой деятельности литейных цехов многих машиностроительных предприятий по параметрам загрязнения окружающей среды.

Поэтому представляет практический интерес для мелкосерийного производства, характерного для самолетостроения, сварной вариант изготовления игольчатой втулки из листовой заготовки (рис. 1, *б*). При этом необходимо решить две технологические задачи:

– разработать процесс получения конического выступа под четвертьоборотный замок на тарелке заготовки игольчатой втулки;

– создать рациональный технологический процесс приварки иголок к тарелке.

В данной статье рассмотрены технологические особенности формообразования конического выступа в тарелке из плоской листовой заготовки и процесса приварки к ней иголок.

Формообразование деталей из плоских листовых заготовок титановых сплавов осуществляют в специальных штампах с электроконтактным нагревом заготовки электрическим током. Данный процесс обеспечивает необходимое качество деталей, однако в мелкосерийном производстве он связан со значительными затратами на изготовление штампов. Кроме того, поверхность получаемых деталей покрыта альфированным слоем, для удаления которого необходимо химическое травление.

По мнению авторов, для формообразования конического выступа в тарелке игольчатой втулки из листовой заготовки можно использовать машину для контактной точечной сварки, которая обеспечивает нагрев заготовки импульсом тока и возможность ее деформирования за счет привода сжатия электродов.

Исследование получения качественных деталей при формообразовании из плоских заготовок осуще-

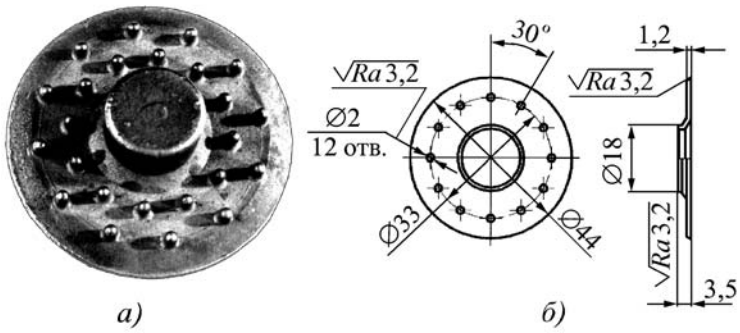


Рис. 1. Литая заготовка игольчатой втулки (*а*) и конструкция тарелки игольчатой втулки в сварном варианте (*б*)

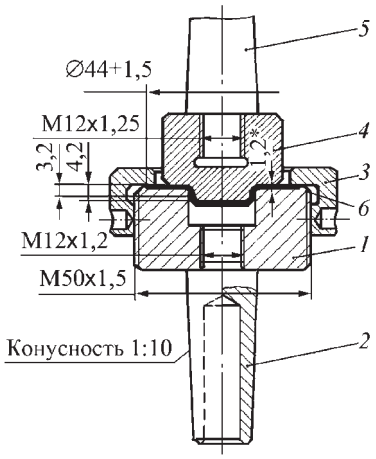


Рис. 2. Схема устройства для деформирования листовых заготовок из титановых сплавов при нагреве

ствляли на образцах в виде дисков диаметром 44 мм и толщиной 1,2...2 мм. Эксперименты выполняли на машине для точечной контактной сварки МТ-2023, дополнительно оснащенной специальным приспособлением, устанавливаемым на ее электроды.

Приспособление [1] для фиксации и формообразования заготовок из листов титановых сплавов представлено на рис. 2. Оно состоит из матрицы *1*, накидной гайки *3* и пуансона *4*. Заготовка *6* из листа сплава ВТ6С фиксируется в матрице, которая установлена на нижнем электроде *2*, а пуансон – на верхнем электроде *5*. Для защиты нагретого металла от окисления в матрице выполнены каналы для подачи инертного газа (аргона) в ее внутреннюю полость.

Для нагрева и деформирования листовой заготовки выбраны режимы точечной сварки пакета из двух заготовок толщиной, равной толщине тарелки игольчатой втулки (табл. 1). Критериями оптимизации режима нагрева при деформировании листовых заготовок служили следующие параметры:

– равномерная форма и толщина металла конического выступа тарелки;

– отсутствие оплавления металла конического выступа;

– предотвращение укрупнения зерна металла в зоне нагрева заготовки.

Эксперименты показали невозможность применения выбранных режимов, поскольку процесс сопровождается разогревом узкой области металла заготовки вокруг оси пуансона, а прилегающая к его боковым поверхностям область металла оказывается слабо разогретой и в момент подачи силы для формообразования находится в малопластичном состоянии. В результате происходит образование трещин и отрыв конического выступа по большему основанию (в зоне его сопряжения с тарелкой игольчатой втулки). Кроме того, такие условия деформирования металла вызывают быстрый износ пуансона и матрицы, изготовленных из внутриокисленной меди.

Поэтому для нагрева заготовок под деформирование было решено изыскивать мягкие режимы, которые характеризуются меньшей величиной тока в импульсе и большей его длительностью. Энергию импульса Q, Дж, вводимую в деталь и преобразуемую в теплоту, найдем по формуле

$$Q = I_{и}^{2} R_{д} \tau,$$

где $I_{и}$ – ток импульса, А; $R_{д}$ – сопротивление детали, Ом; τ – длительность импульса тока, с.

Установлено, что при нагреве заготовок из сплава ВТ6С под деформирование величина тока импульса в наибольшей степени определяет температуру заготовки в зоне ее контакта с пуансоном. Длительностью протекания импульса тока определяется диаметр зоны нагрева заготовки до температуры пластичного состояния ее материала.

Известно, что высокие пластические свойства титанового сплава ВТ6С обеспечиваются при температуре 650...680 °С [2]. Поэтому были проведены исследования зависимости температуры нагрева заготовки от тока импульса. Для измерения температуры нагрева заготовки применяли сканирующий микропирометр, датчик которого был размещен в специальном канале нижнего электрода, на котором установлена матрица приспособления.

Результаты измерения температуры нагрева заготовки при варьировании тока в импульсе представлены на рис. 3. Видно, что температура пластичного состояния сплава ВТ6С (650...680 °С) достигается при токе 4,2...4,5 кА. Дальнейшее его повышение сопровождается постепенным нарастанием температуры нагрева до 880...950 °С, что приводит к существенному укрупнению размера зерна материала заготовки. Диаметр зоны нагрева составляет 18...20 мм.

1. Ориентировочные режимы контактной точечной сварки титанового сплава ВТ6С

Толщина, мм	Радиус сферы электродов, мм	Ток импульса, кА	Длительность импульса, с	Сила сжатия электродов, кН	Диаметр ядра точки, мм
1,2 + 1,2	75...100	6,5	0,20...0,25	2,94...3,4	5,5
2,0 + 2,0	100...150	9,0	0,30...0,35	4,4...4,9	7,0

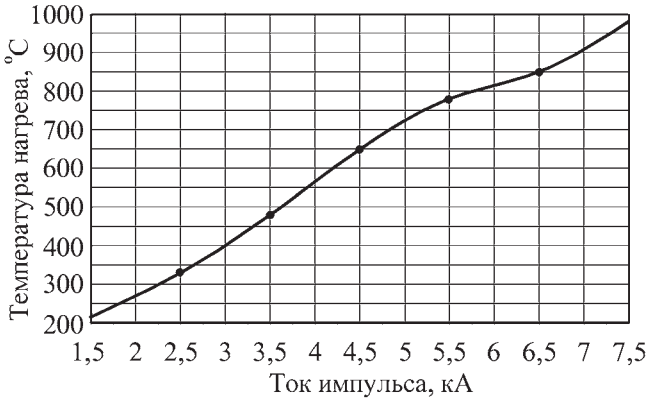


Рис. 3. Влияние тока импульса (длительность 0,32 с) на температуру нагрева центральной части листовой заготовки из сплава ВТ6С толщиной 2 мм

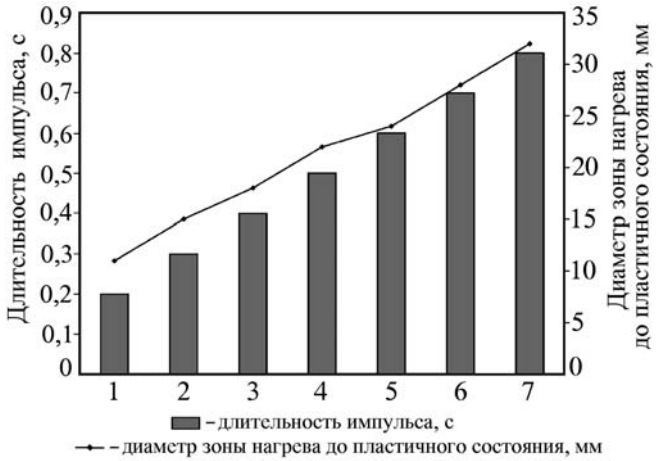


Рис. 4. Влияние длительности импульса на размеры (диаметр) зоны заготовки из сплава ВТ6С, нагретой до температуры 680 °С. Ток импульса 4,2...4,3 кА

Увеличение длительности импульса тока (рис. 4) сопровождается расширением области заготовки, нагретой выше 680 °С. Для тарелки и размеров конического выступа, соответствующих размерам игольчатой втулки (см. рис. 1, *б*), диаметр зоны нагрева составляет 24...28 мм и достигается при токе импульса 4,5 кА длительностью 0,5...0,7 с. Оптимальные параметры режима нагрева и деформирования заготовок из сплава ВТ6С толщиной 1,4 и 2 мм приведены в табл. 2.

Внешний вид типовой заготовки, полученной на этих режимах, показан на рис. 5. Как видно, равномерный конический выступ не имеет морщин, складок, трещин и других дефектов. Установлено также, что рекомендуемые режимы импульсного нагрева под

2. Режимы нагрева заготовок игольчатых втулок из сплава ВТ6С под формирование конического выступа

Толщина, мм	Ток импульса, кА	Длительность импульса, с	Сила осадки, кН
1,2	3,2...3,5	0,35...0,50	2,0...2,3
2,0	4,2...4,5	0,50...0,70	3,2...3,5

Рис. 5. Внешний вид заготовки втулки после деформирования с нагревом в электродах машины точечной контактной сварки

деформирование позволяют получить 125...140 заготовок с использованием одного комплекта приспособления для деформирования. При этом ресурс матрицы в 2–2,5 раза выше, чем пуансона.

Анализ показал, что микроструктура металла в зоне нагрева и деформирования выступа практически идентична микроструктуре заготовки на участках, не подвергавшихся нагреву.

Технология деформирования листовых заготовок при формировании конического выступа тарелки игольчатой втулки следующая:

1. Установка и фиксация листовой заготовки в матрице с помощью накидной гайки.
2. Подача защитного газа в матрицу.
3. Опускание пуансона до его контакта с поверхностью заготовки.
4. Подача импульса нагрева заготовки.
5. Осадка разогретой заготовки путем включения ковочной силы контактной машины.

После формования конусного выступа проводят токарную обработку для получения тарелки заданного диаметра с выступом требуемой высоты.

Для оценки механических свойств металла выступа тарелки образцы (их центральную часть) из листа сплава ВТ6С толщиной 2 мм подвергали импульсному нагреву в специальном приспособлении. Схема нагрева образцов для испытаний полностью имитировала схему нагрева заготовки под формирование выступа за исключением подачи силы осадки. Результаты испытаний представлены в табл. 3. Анализ показывает, что механические свойства материала конического выступа тарелки игольчатой втулки соответствуют свойствам листа сплава ВТ6С после низкотемпературного отжига.

Второй этап изготовления игольчатой втулки – операция приварки иголок к тарелке контактной точечной сваркой. Для этого в тарелке выполняют отверстия, в которые перед сваркой устанавливают иголки в виде заклепок, состоящих из стержня и головки (рис. 6, *а*). В этом

3. Механические свойства листов сплава ВТ6С толщиной 2 мм

Состояние образца	Предел прочности $\sigma_в$, МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ, %
Прокат + отжиг (650 °С, 2 ч, аргон)	920	760	9
Имитация нагрева под формообразование (680 °С, 0,65 с)	850	725	12

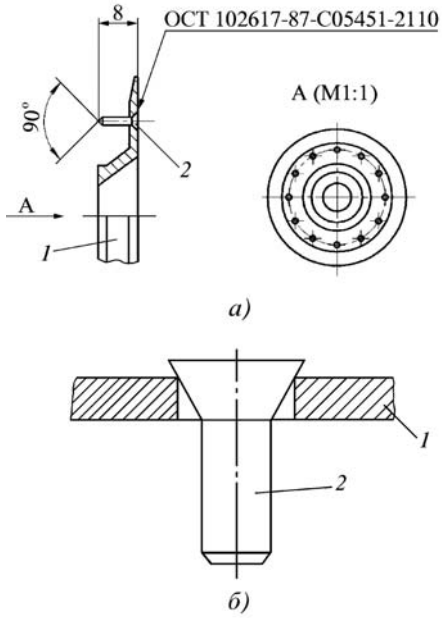


Рис. 6. Расположение иголок на тарелке втулки (*а*) и рельеф типа "кромка отверстия" (*б*) при сварке тарелки с иголкой: *1* – тарелка; *2* – заклепка

случае соединение между иголкой и тарелкой формируется по схеме соединения при рельефной контактной сварке с рельефом типа "кромка отверстия" (рис. 6, *б*).

При отработке режимов сварки заклепки с тарелкой использовали верхний электрод стандартного типа из бронзы марки БрНБТ с плоской рабочей поверхностью, перекрывающей диаметр головки привариваемой заклепки. В нижнем электроде выполнено отверстие по диаметру стержня заклепки, который выбирали исходя из расстояния между стержнями свариваемых заклепок.

Эксперименты по сварке заклепок с тарелкой игольчатой втулки показали, что соединение формируется без образования расплавленной зоны во всем диапазоне изменения тока импульса (3...4,5 кА) и его длительности (0,02...0,1 с). При увеличении силы сжатия от 2000 до 3800 Н в стержне заклепки возникают трещины, но литой зоны не образуется.

Отсутствие расплавленной зоны в контакте головки заклепки с тарелкой объясняется характером протекания сварочного тока. При таком варианте сборки соединения под сварку сварочный ток протекает от верхнего электрода через его контакт с головкой заклепки и ее стержень в нижний электрод. В этом случае в контакте головки заклепки с тарелкой не выделяется достаточно теплоты для образования литой зоны.

Для ее формирования необходимо обеспечить гарантированное протекание тока через контакт головка заклепки – тарелка. С этой целью нужно изолировать стержень заклепки от нижнего электрода, а диаметр зоны протекания тока в нем вынести за пределы головки заклепки (рис. 7).

Металлографический анализ структуры соединений заклепки с тарелкой игольчатой втулки показал, что при использовании предложенной технологии выполнения соединения во всем диапазоне изменения параметров режима сварки наблюдается формирование кольцевого проплавления в виде литой зоны в головке заклепки и металле тарелки. Отмечено вытекание расплавленного металла из под головки заклепки со стороны ее стержня и образование кольцевого буртика высотой до 0,2 мм вокруг стержня заклепки.

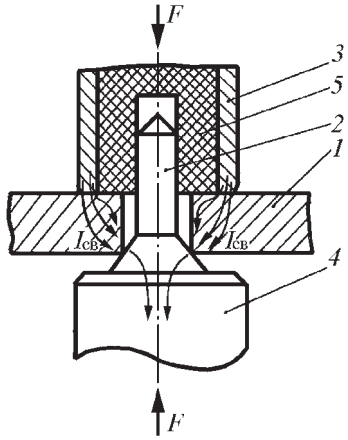


Рис. 7. Схема протекания сварочного тока через собранное соединение заклепки с тарелкой игольчатой втулки (повернуто на 180°): *1* – тарелка; *2* – заклепка; *3* – верхний электрод; *4* – нижний электрод; *5* – изоляционная втулка

Сравнительные механические испытания выпрессовкой заклепок показали, что при формировании соединения без образования литой зоны наибольшая разрушающая нагрузка составила 1450...1990 Н, а с формированием литой зоны 2194...2300 Н.

Опыт использования разработанной технологии в мелкосерийном производстве показал возможность снижения на 38...42 % себестоимости изготовления игольчатых втулок по сравнению с литым вариантом. Кроме того, отпадает необходимость изготовления сложной штамповой оснастки.

Выводы

Разработана технология формования конических выступов на листовых заготовках игольчатых втулок из титановых сплавов. Предложенная технология основана на импульсном нагреве заготовки в зоне деформирования с последующей осадкой в специальном приспособлении, установленном на электродах машины контактной точечной сварки.

Определены оптимальные значения тока импульса и его длительности, позволяющие получить заготовки без дефектов и существенных изменений микроструктуры.

Разработана конструкция приспособления для формования конического выступа игольчатых втулок, которое позволяет получить 125...140 качественных заготовок.

Предложена технология выполнения соединения заклепки с тарелкой, обеспечивающая формирование литой зоны между головкой заклепки и металлом тарелки. Разработана конструкция нижнего электрода для выполнения соединения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пат. 53201 РФ** на полезную модель. Устройство для деформирования листовых заготовок из титановых сплавов при их нагреве / В.В. Овчинников, В.В. Алексеев, В.Б. Верденский. Приоритет 01.11.05.

2. **Справочник** по сварке цветных металлов / С.М. Гуревич, отв. ред. В.Н. Замков. 2-е изд. перераб. и доп. Киев: Наук. думка, 1990. 512 с.

Виктор Васильевич Овчинников, д-р техн. наук;
Сергей Вячеславович Смирнов, инженер;
Марина Алексеевна Гуреева, канд. техн. наук

УДК 621.77.016.2

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

Прессование труб из некомпактных материалов*

На основе теории залечиваемости усовершенствована схема прессования полых изделий, позволяющая интенсифицировать процессы устранения дефектов некомпактных материалов, расширить номенклатуру получаемых изделий по размерам и применяемым материалам.

On the basis of the consolidation theory perfection of the pressing scheme of the hollow products is made, allowing to intensify processes of elimination of noncompact materials defects, to expand the nomenclature of received products in the sizes and applied materials.

Ключевые слова: машиностроение; обработка металлов давлением; прессование; спекание и штамповка изделий из некомпактных материалов.

Key words: mechanical engineering; metal forming; pressing; sintering and stamping of products made of noncompact materials.

Процесс изготовления труб прессованием радиальным выдавливанием в кольцевую полость и последующим обжимом применяют для получения сравнительно коротких тонкостенных трубных заготовок, гильз и других полых изделий [1].

Схема процесса приведена на рис. 1. Заготовка *2* пуансоном *1* выдавливается из контейнера *3* через зазор *S*, образованный торцевой поверхностью оправки *5* и торцевой поверхностью матрицы *4*. Торцевая поверхность матрицы состоит из двух участков: плоского шириной *a* и радиусного с радиусом закругления $R_м$. На радиусном участке происходит обжим (свертка) выдавливаемого через зазор *S* диска вследствие радиального течения металла.

Экспериментальное опробование показало важные преимущества процесса: снижение технологических сил по сравнению с традиционными процессами прессования; возможность получения труб с диаметром больше диаметра заготовки, без предварительной прошивки отверстия; снижение разностенности труб; удобство съема изделия с оправки.

Характер течения металла при таком способе прессования позволяет предположить возможность использования процесса для обработки некомпактных материалов.

Исследования проводили на стружке алюминиевого сплава АК7ч (АЛ9). Стружку брикетировали в контейнере. Размеры брикетов: диаметр 35 мм, высота 50...70 мм.

Конструктивная схема экспериментального штампа приведена на рис. 2.

Температура нагрева штампа и заготовки перед прессованием 460 °С. Прессование труб с различной толщиной стенки выполняли в режиме изотермической деформации на гидравлическом прессе Д0634 с номинальной силой 2,5 МН. Толщину стенки изменяли варьируя зазор *S*, равный 4, 3 и 2 мм, с помощью сменных матриц *5* (см. рис. 1).

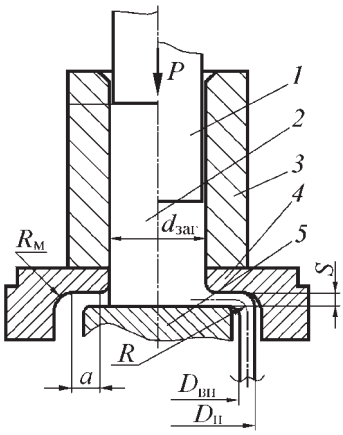


Рис. 1. Расчетная схема прессования труб

*Работа выполнена в рамках аналитической ведомственной целевой программы "Развитие научного потенциала высшей школы (2006–2008 годы)" по проекту РНП 8355 "Создание научных основ формирования свойств изделий общего и специального назначения методами комбинированных термопластических деформаций материалов", а также гранта РФФИ № 08-08-00407-а.

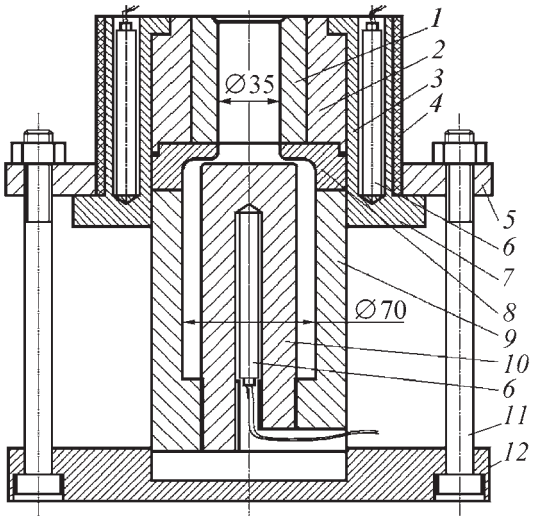


Рис. 2. Конструктивная схема штампа для прессования труб:
1 – контейнер; *2* – бандаж; *3* – нагреватель; *4* – асбестовый кожух; *5* – прижим; *6* – ТЭН; *7* – нагреватель; *8* – сменная матрица; *9* – стойка; *10* – оправка; *11* – стяжной болт; *12* – нижняя плита

Качество получаемых труб было неудовлетворительное, как по наличию внутренних и поверхностных дефектов в виде несплошностей по границам частиц некомпактного материала, так и по механическим свойствам. Моделирование процесса течения и расчет залечиваемости показали такие же результаты.

Диаграмма залечиваемости сплава АК7ч (АЛ9) была построена по методике [2]. В качестве исходного материала для изготовления образцов для испытания на растяжение и построения кривой упрочнения использовали образцы после испытания на залечиваемость осадкой в бандаже с кольцевыми проточками [2] со следующими механическими свойствами при комнатной температуре: $\sigma_т$ = 120 МПа; δ = 21 %.

Кривую упрочнения строили путем испытания образцов на растяжение при температуре 460 °С при скоростях деформации 1 и 10 $с^{-1}$. Этот интервал скоростей деформации установлен предварительным моделированием в программном комплексе Forming [3] процесса течения при прессовании идеального жесткопластического материала с напряжением текучести σ_s = 1.

Кривая упрочнения сплава АК7ч (АЛ9) аппроксимирована зависимостью:

$$\sigma_s = 46\varepsilon_0^{0,21}(0,005+\dot{\varepsilon}_и)^{0,032}, \qquad (1)$$

где $\varepsilon_0 = \int \dot{\varepsilon}_и d\tau$ – степень деформации, $\dot{\varepsilon}_и = \sqrt{2/3}\times$ $\times\sqrt{\dot{\varepsilon}_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij}}$ – интенсивность скоростей деформации; $\dot{\varepsilon}_{ij}$ – компоненты девиатора скоростей деформации.

На рис. 3 приведены изолинии степени деформации ε_0 и коэффициента жесткости схемы напряженного состояния $\eta = 3\sigma/\sigma_и$ (где σ – среднее напряжение; $\sigma_и$ – интенсивность напряжений) в установившейся стадии процесса, а на рис. 4 – диаграмма залечиваемости и пути деформирования в опасной зоне при прессовании труб радиальным и комбинированным выдавливанием.

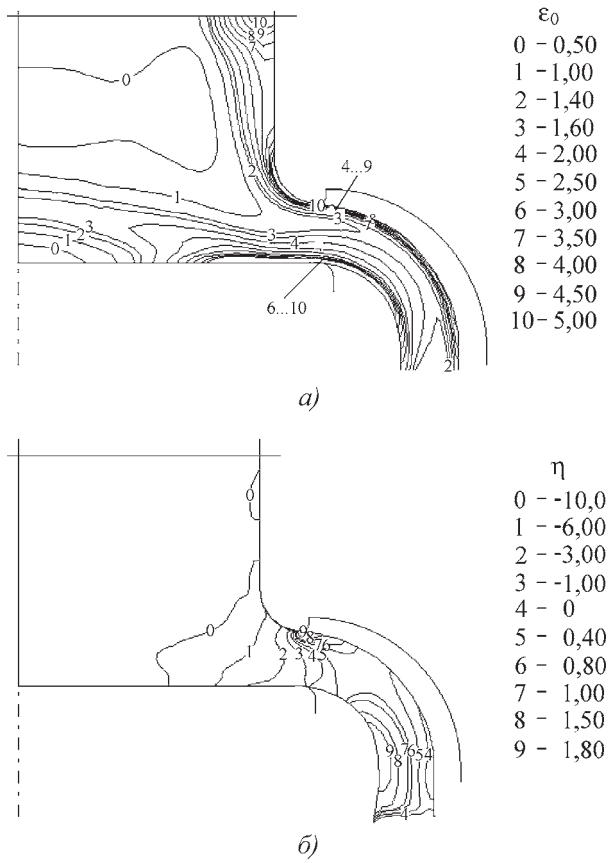


Рис. 3. Изолинии степени деформации ε_0 (*а*) и коэффициента жесткости схемы напряженного состояния η (*б*) при прессовании труб радиальным выдавливанием при *S* = 4 мм

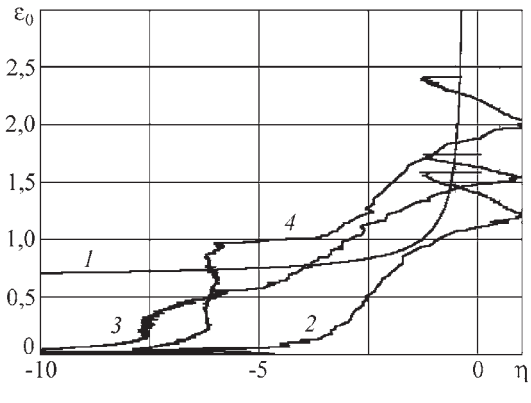


Рис. 4. Диаграмма залечиваемости сплава АК7ч (АЛ9) (*1*) и пути деформирования в опасной зоне при прессовании труб радиальным (*2*, *3*) и комбинированным (*4*) выдавливанием:
2, *4* – *S* = 4 мм; *3* – *S* = 2 мм

Для оценки залечиваемости дефектов пористой заготовки использовали критерий [3]:

$$\zeta_{ij}\zeta_{ij} = 1, \qquad (2)$$

где

$$\zeta_{ij} = \int_0^{\varepsilon_0^*} \frac{b\exp(b\vartheta)}{\varepsilon_м(\eta)[\exp(b)-1]}\beta_{ij}\,d\varepsilon_0 \qquad (3)$$

– компоненты тензора залечиваемости; $\varepsilon_м(\eta)$ – диаграмма залечиваемости; ε_0^* – степень деформации к концу процесса деформации; b – параметр модели залечиваемости (для алюминиевых сплавов рекомендуется $b = 2{,}8$); $\vartheta = \dfrac{\varepsilon_0(\eta)}{\varepsilon_м(\eta)} \le 1$ – параметр залечиваемости; β_{ij} – направляющий тензор скоростей деформации.

Мера залечиваемости (2) в данном случае принимает вид:

$$\zeta_и = \sqrt{\zeta_\rho^2 + \zeta_z^2 + \zeta_\varphi^2 + 2\zeta_{\rho z}^2}, \qquad (4)$$

где ζ_ρ, ζ_z, ζ_φ, $\zeta_{\rho z}$ – компоненты тензора залечиваемости:

$$\left.\begin{aligned}
\zeta_\rho &= \int_0^{\varepsilon_0^*} \frac{b\exp(b\vartheta)}{\varepsilon_м(\eta)[\exp(b)-1]}\beta_\rho\,d\varepsilon_0;\\
\zeta_z &= \int_0^{\varepsilon_0^*} \frac{b\exp(b\vartheta)}{\varepsilon_м(\eta)[\exp(b)-1]}\beta_z\,d\varepsilon_0;\\
\zeta_\varphi &\int_0^{\varepsilon_0^*} \frac{b\exp(b\vartheta)}{\varepsilon_м(\eta)[\exp(b)-1]}\beta_\varphi\,d\varepsilon_0;\\
\zeta_{\rho z} &= \int_0^{\varepsilon_0^*} \frac{b\exp(b\vartheta)}{\varepsilon_м(\eta)[\exp(b)-1]}\beta_{\rho z}\,d\varepsilon_0
\end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

и для варианта прессования при $S = 2$ мм равна единице.

Однако на поверхности детали наблюдались дефекты в виде расслоений (рис. 5). Это можно объяснить значительной деформацией в конце процесса (на выходе из калибрующего зазора S) при неблагоприятной схеме напряженного состояния, когда $\eta \ge -1$.

Для интенсификации процессов залечиваемости дефектов некомпактных материалов предложена схема прессования (рис. 6) комбинированным выдавливанием, отличающаяся сочетанием прямого (участок 1) и радиального (участок 2) выдавливания.

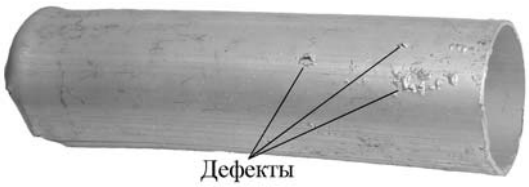


Рис. 5. Дефекты в виде расслоений на поверхности трубы, отпрессованной по схеме радиального выдавливания

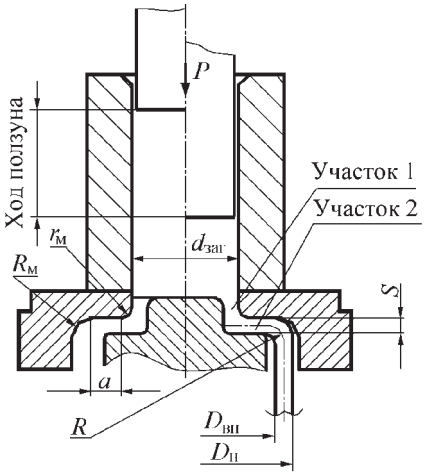


Рис. 6. Схема прессования труб комбинированным выдавливанием

На рис. 7 приведены изолинии ε_0 и η, полученные в результате моделирования этой схемы прессования с теми же исходными данными, которые были приняты

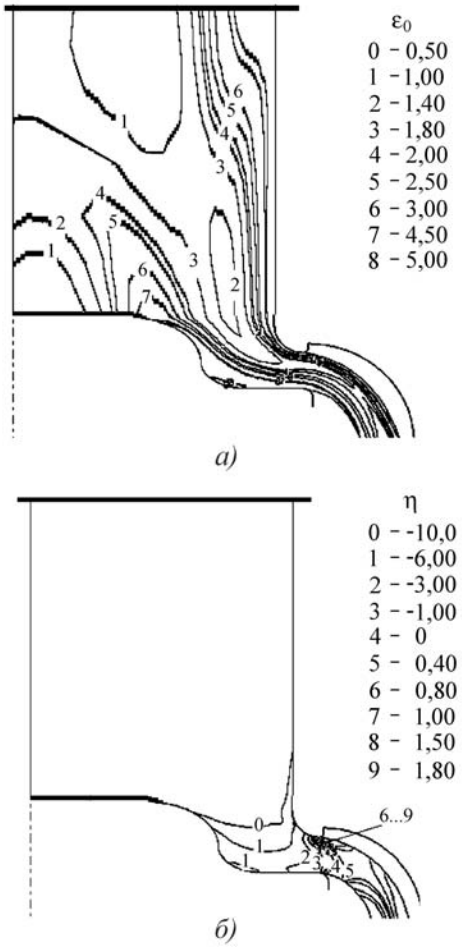


Рис. 7. Изолинии степени деформации ε_0 (*а*) и коэффициента жесткости схемы напряженного состояния η (*б*) при прессовании труб комбинированным выдавливанием при S = 2 мм

Рис. 8. Образцы труб

для прессования радиальным выдавливанием через калибрующий зазор $S = 2$ мм.

Путь деформирования в опасной зоне для этого случая показан на рис. 4 (кривая *4*). Анализ приведенных данных показывает, что изменение геометрии инструмента привело к существенному изменению схемы напряженного состояния в период интенсивного увеличения степени деформации в опасной зоне. При практически постоянном значении $\eta = -13...-12{,}5$ степень деформации достигает значения $\varepsilon_0 \approx 1$. Накопленная за процесс степень деформации достигает $\varepsilon_0 = 2{,}04$, в то время как при прессовании радиальным выдавливанием $\varepsilon_0 = 1{,}52$.

На рис. 8 приведены образцы труб с толщиной стенки 2 мм, отпрессованных по схеме комбинированного выдавливания без поверхностных дефектов и регламентными механическими свойствами ($\sigma_т = 120$ МПа; $\delta = 21$ %).

После прессования трубы подвергали правке и калибровке. Расчетное значение меры залечиваемости (4) при прессовании трубы с толщиной стенки 2 мм по схеме комбинированного выдавливания достигло 1,3. Такое расхождение между расчетными и экспериментальными результатами объясняется специфическим изменением схемы напряженного состояния в процессе деформации, при котором значительные деформации достигаются в условиях растягивающих напряжений. В других процессах, когда деформации растут в условиях только сжимающих напряжений соответствие расчетных и экспериментальных данных лучше.

Одним из наиболее важных технологических параметров рассматриваемого процесса является радиус закругления на рабочей поверхности матрицы $R_м \approx (1{,}1...1{,}15)R$, где R – радиус свободного изгиба. При $R_м < R$ происходит закручивание переднего края изделия внутрь полости трубы. При закручивании передние слои трубы соприкасаются с оправкой, возникают силы трения, препятствующие движению, и вследствие этого происходит поперечная потеря устойчивости трубы. При $R_м > R$ возможны продольные разрывы

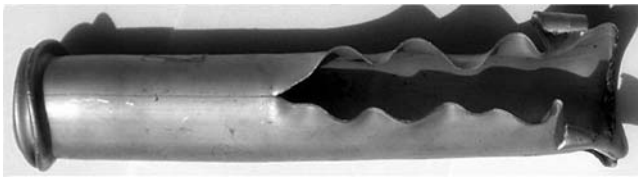


Рис. 9. Разрыв и поперечные складки из-за неправильно выбранного радиуса $R_м$ = 1,2 мм

из-за чрезмерного увеличения радиуса края трубы в начале процесса (рис. 9).

Программный комплекс Forming позволяет успешно решать проблему выбора величины $R_м$ при проектировании матриц для прессования. На рис. 10 приведены расчетная и экспериментальная формы очага деформации на участке свободного изгиба. Совпадение результатов моделирования и эксперимента в этом случае свидетельствует о том, что программный комплекс адекватно отражает реальное течение в исследуемом процессе.

Рассмотренный способ прессования полых изделий из некомпактных материалов имеет ограничения, обусловленные неблагоприятной схемой напряженного состояния в той области очага деформации, в которой происходит сворачивание диска в трубу. Для дальнейшего улучшения схемы напряженного состояния разработана схема прессования радиальным выдавливанием во внутреннюю кольцевую полость (рис. 11).

Новая схема сохраняет преимущества схемы прессования радиальным выдавливанием в наружную кольцевую полость. При этом схема напряженного состояния на всем протяжении процесса деформации характеризуется отрицательным средним напряжением.

Новый процесс прессования исследовали с использованием штампа, конструктивная схема которого приведена на рис. 12.

Экспериментальные работы по моделированию кинематики течения проводили на свинце С1. На рис. 13 показаны экспериментальная и расчетная координатные сетки. В связи с необходимостью модели-

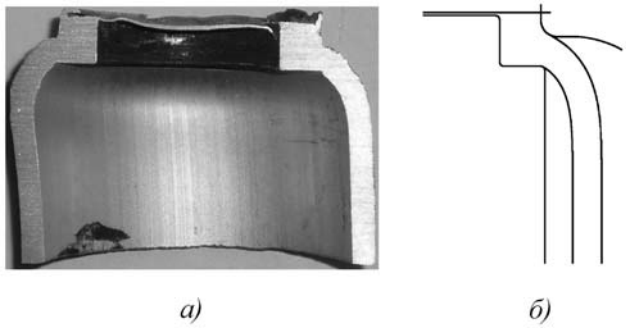


Рис. 10. Экспериментальная (*а*) и расчетная (*б*) формы очага деформации на участке свободного изгиба при прессовании трубы

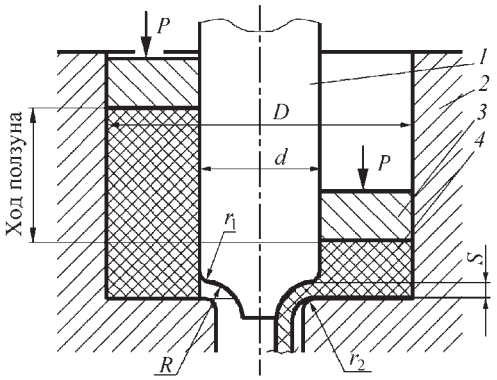


Рис. 11. Схема процесса прессования труб радиальным выдавливанием во внутреннюю кольцевую полость:
1 – оправка; *2* – контейнер; *3* – пресс-шайба; *4* – заготовка

рования течения с большими вытяжками в данном случае метод координатных сеток использовали только для оценки качественного соответствия экспериментальных и расчетных данных. Качественный анализ экспериментальной координатной сетки позволил выявить зону неблагоприятного деформированного состояния, установить соответствие экспериментальной и расчетной области свободного изгиба и сократить объем последующих расчетов.

Залечиваемость дефектов исследовали на стружке алюминиевого сплава АК7ч (АЛ9). Стружку брикетировали в цилиндрическом контейнере с оправкой в плавающем контейнере. Размеры брикетов 1-й партии: $D = 50$ мм; $d = 20$ мм; высота 50...70 мм; 2-й партии: $D = 68$ мм; $d = 39$ мм, высота 50...70 мм (рис. 14). Температура нагрева штампа и заготовки перед прессованием 460 °С. Прессование труб с толщиной стенки 2,5 мм проводили на гидравлическом прессе Д0634 с номинальной силой 2,5 МН. Коэффициент вытяжки λ изменяли за счет применения брикетов различных размеров и сменных комплектов оправок и матриц (см. рис. 12).

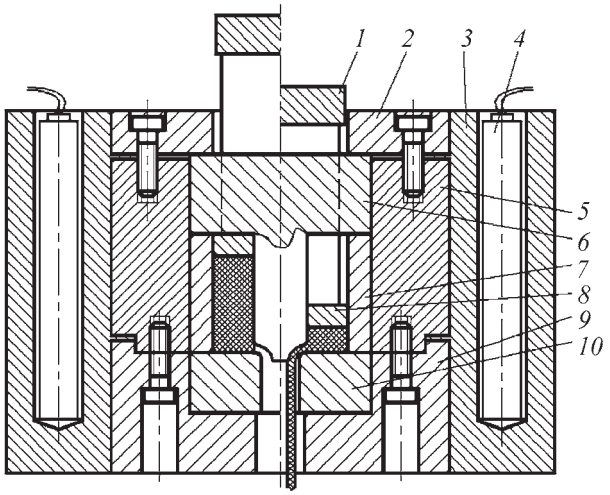


Рис. 12. Схема экспериментального штампа для исследования процесса прессования труб радиальным выдавливанием во внутреннюю кольцевую полость:
1 – пуансон; *2* – прижим; *3* – нагреватель; *4* – ТЭН; *5* – бандаж; *6* – оправка; *7* – контейнер; *8* – пресс-шайба; *9* – матрицедержатель; *10* – сменная матрица

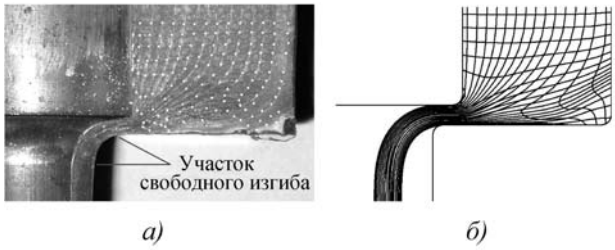


Рис. 13. Экспериментальная (*а*) и расчетная (*б*) координатные сетки

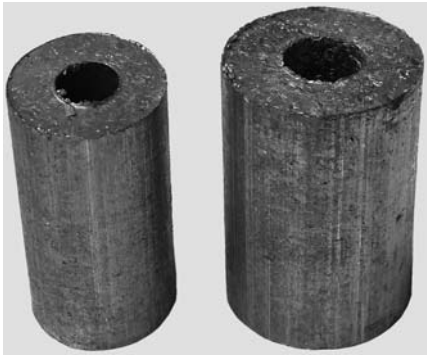


Рис. 14. Брикеты из сплава АК7ч (АЛ9) для прессования труб радиальным выдавливанием во внутреннюю кольцевую полость

В результате экспериментальных работ установили, что несмотря на благоприятную схему напряженного состояния в исследуемом процессе существуют ограничения, определяющие технологические параметры процесса для обеспечения гарантированного качества изделий по механическим свойствам.

При коэффициенте вытяжки $\lambda < 5$ на поверхности труб наблюдаются задиры большого размера, передний конец рваный, на изломе ясно видны фрагменты стружки и их границы; если $5 < \lambda < 8$, то прессованное изделие имеет форму трубы, из него можно вырезать образцы для механических испытаний, но на поверхности встречаются задиры. Качественные изделия получаются при $\lambda = 9...10$.

Расчет меры залечиваемости (4) с компонентами (5) показал, что в опасной зоне $\zeta_и = 1$ при $\lambda = 7{,}6$.

На рис. 15 показан путь деформирования в опасной зоне для $\lambda = 7{,}6$ (кривая *2*), на которой видно, что на завершающей стадии процесса формирования трубы приращение степени деформации $\Delta\varepsilon_0 \approx 0{,}2$ происходит в рискованной области схем напряженного состояния. Это требует некоторого запаса по коэффициенту вытяжки.

На рис. 16 приведены свинцовые модели и трубы из стружки сплава АК7ч (АЛ9) диаметром 14 и 35 мм, полученные соответственно с коэффициентом вы-

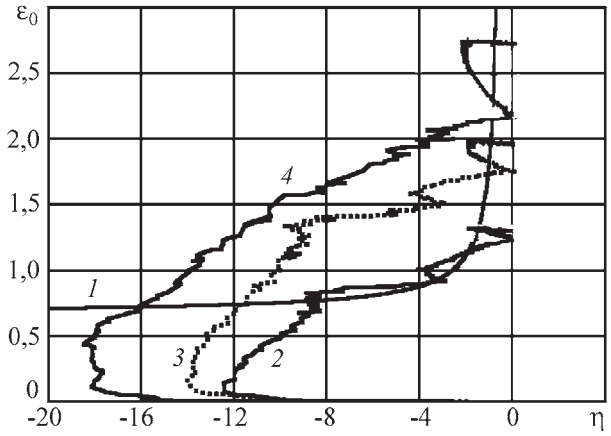


Рис. 15. Диаграмма залечиваемости (*1*) и пути деформирования в опасной зоне при различных коэффициентах вытяжки:
2 – λ = 7,6; *3* – λ = 11; *4* – λ = 14,6

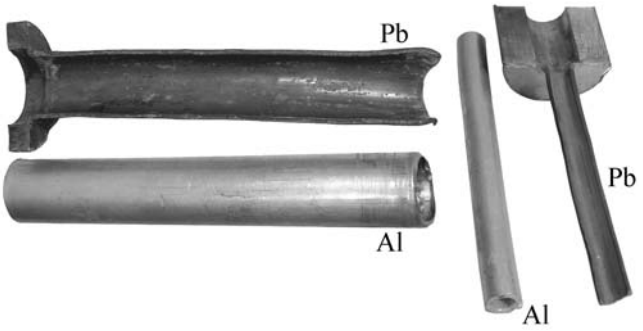


Рис. 16. Свинцовые модели и образцы труб из стружки сплава АК7ч (АЛ9), полученных прессованием радиальным выдавливанием во внутреннюю кольцевую полость

тяжки λ = 14,6 из брикетов 1-й партии λ = 11 из брикетов 2-й партии.

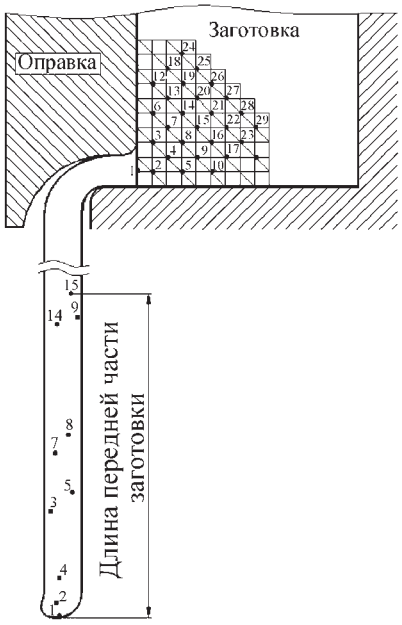
При прессовании некомпактных материалов существуют особенности при оценке коэффициента выхода годного, связанные с размерами некачественной части заготовки. Увеличенный размер некачественной передней части заготовки обусловлен тем, что в неустановившейся стадии процесса в областях, в которых течение материала начинается раньше, степень деформации и схема напряженного состояния могут не соответствовать условиям залечиваемости дефектов. Размеры указанных областей можно определить на основе развитой теории залечиваемости.

На рис. 17 показана некачественная передняя часть заготовки при λ = 14,6, которая определена путем расчета меры залечиваемости для точек координатной сетки, местоположение которых до начала деформации приведено в верхней части рисунка, а после деформации – в его нижней части. Также на рис. 17 в качестве примера показаны пути деформирования для 4, 8 и 15-й точек.

Мера залечиваемости для точек, расположенных в пределах длины передней части заготовки (см. рис. 17, *а*) меньше единицы. Таким образом, возможность расчета длины передней части заготовки, удаляемой в отход, позволяет сделать правильный выбор размеров исходной заготовки, а также оптимизировать указанный размер путем изменения соотношения ее размеров.

Для получения качественных изделий прессованием радиальным выдавливанием важен правильный выбор радиуса закругления оправки R (см. рис. 11). Экспериментально установлено, что значение R должно быть в интервале $R = (0{,}95...1{,}05)R_{изг}$, где $R_{изг}$ – радиус участка свободного изгиба прессуемой трубы (см. рис. 13).

Если R больше указанных значений, то происходит продольная потеря устойчивости прессуемого изделия (рис. 18), а если меньше – закручивание передней части заготовки до касания с матрицей и вследствие тре-



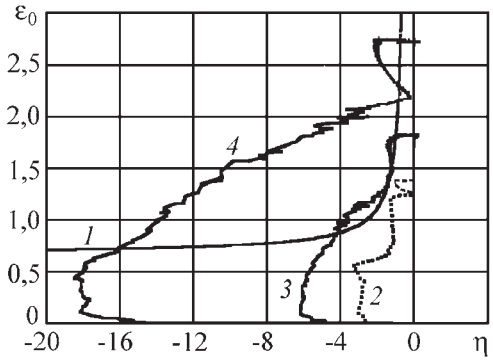


Рис. 17. Диаграмма залечиваемости (*1*) и пути деформирования в опасной зоне в неустановившейся стадии процесса при λ = 14,6 для различных точек координатной сетки передней части заготовки:
2 – 4-я точка; *3* – 8-я точка; *4* – 15-я точка

Рис. 18. Продольная потеря устойчивости при прессовании трубы с увеличенным радиусом *R*

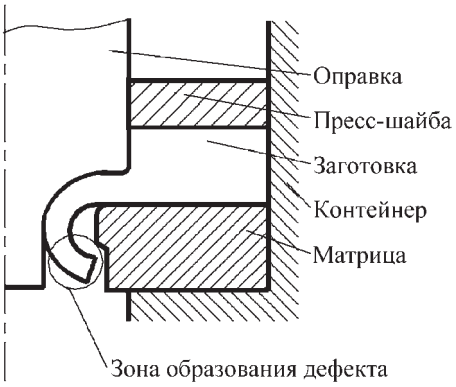


Рис. 19. Механизм образования дефектов в виде разрывов или поперечных складок

ния поперечное складкообразование или разрыв из-за появления растягивающих напряжений (рис. 19).

Радиус свободного изгиба назначают по результатам математического моделирования кинематики течения, сопоставление результатов которого с экспериментом приведено на рис. 13.

Вывод

Разработанный технологический процесс прессования позволяет получать качественные полые цилиндрические изделия из некомпактных материалов за счет интенсификации пластического течения металла. Интенсификация достигается благодаря новой схеме деформации, сочетающей прямое и радиальное выдавливание.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Шестаков Н.А.** Расчетная модель процессов прессования труб методом "Raflo" // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургіі і машинобудуванні: тематичний збірник наукових праць. Краматорськ, 2002. С. 324–330.

2. **Шестаков Н.А.** Исследование влияния напряжений всестороннего сжатия и степени горячей пластической деформации на сварку фрагментов стружковых заготовок // Вестник МГТУ. Машиностроение. 2002. № 3. С. 74–79.

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

4. **Дёмин В.А., Шестаков Н.А., Субич В.Н.** Обобщенная модель повреждаемости-залечиваемости металлов в процессах пластической деформации // Materialy III Sympozjum Mechaniki Zniszczenia Materialow i Konstrukcji. Augustow, 1–4 czerwca, 2005. P. 75–76.

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

ООО "Издательство Машиностроение" продолжает подписку на журнал

«Заготовительные производства в машиностроении»

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

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

107076, г. Москва, Стромынский пер., д. 4,
тел.: (499) 269-6600, 269-5298, факс: (499) 269-4897,
e-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru

УДК 621.981

М.В. Илюшкин, В.А. Марковцев, И.И. Лазарев *(ОАО "Ульяновский НИАТ")*

Выбор оптимальной формы ножа для рубки профилей замкнутого типа в штампах с помощью программы ANSYS/LS-DYNA

Приведены результаты моделирования процесса рубки профилей замкнутого типа в штампах ножами различной формы. Выбрана оптимальная форма ножа, обеспечивающая минимальное искажение поперечного сечения профиля. Проведена практическая апробация модели.

The result of model process conducted for chopping closed profile in dies with punches of different shape are considered. The optimal shape of the punch is chosen. It ensures the minimal distortion of the profile's transverse section. The practical inspect of the model is developed.

Ключевые слова: моделирование; Ls-dyna; штамп; рубка; профиль замкнутого типа; оптимальная форма ножа.

Key words: simulation; Ls-dyna; die; chop; closed profile; optimal punch's shape.

Процесс рубки в штампах применяют в основном для профилей открытого поперечного сечения, например, уголкового и швеллерообразного типа. При использовании аналогичных штампов для профилей замкнутого поперечного сечения, например, для квадратных и прямоугольных труб, рубка приводит к сильному искажению поперечного сечения. Поэтому в большинстве случаев при изготовлении труб на гибочно-прокатных станах используют отрезные пилы типа Makita, Dewalt и др.

Рубка в штампах более технологична по сравнению с отрезкой пилой. Процесс рубки позволяет уменьшить время разделительной операции, снизить уровень шума, улучшить условия труда, исключить наличие в воздухе частиц абразива или металлической пыли. Разработка конструкции штампа, позволяющего производить рубку профилей с минимальным искажением поперечного сечения, является одной из основных задач для увеличения производительности процесса изготовления профилей замкнутого типа на гибочно-прокатных станах.

Работу над конструкцией отрубного штампа можно проводить в двух направлениях:

1. Разработка новой конструкции штампа с применением нескольких последовательных отрубных операций или плавающих ножей со сложным поступательным движением;

2. Применение конструкции штампа для профилей открытого поперечного сечения с доработкой его основных частей или элементов.

В данном случае выбрано второе направление.

Основной элемент, воздействующий на профиль при рубке, – нож (пуансон) штампа. Задача данных исследований – выбор оптимальной формы ножа, позволяющей получить минимальное искажение поперечного сечения после рубки.

Рубка представляет собой процесс разделения или разрушения металла между ножом и матрицей. Задачами разрушения металла занимались такие ученые, как Л.М. Кочанов, В.З. Партон, Е.М. Морозов и др. Применение компьютерных программ, например, Ansys [1] и Ls-dyna [2], основанных на методе конечных элементов [3], позволяет смоделировать процесс разрушения для большинства конкретных практических задач.

Исследования проводили в программе Ansys/Ls-dyna с использованием пре- и постпроцессора Ansys, а в решателе – программы Ls-dyna. В качестве объекта исследования был выбран профиль с сечением замкнутого типа – труба 15×25×1,2 (рис. 1). Профиль прямоугольного поперечного сечения, изготовленный из тонколистовой холоднокатаной стали марки 08ю по ГОСТ 16523–89, применяется в сварных конструкциях лестничных маршей в качестве обрешетки. Твердотельная модель штампа в виде упрощенной конструкции (рис. 2, см. обложку), содержащей нож *1* и полуматрицу *2*, была представлена только половиной штампа в силу его симметрии.

На начальной стадии исследования рубки профиля выбрали четыре вида ножей (рис. 3, см. обложку). Размеры матрицы и профиля уменьшали до минимально возможных для сокращения времени расчета при одновременном обеспечении достоверности результатов. Модели последовательно передавались в препроцессор Ansys, где создавалась конечно-элементная модель и при-

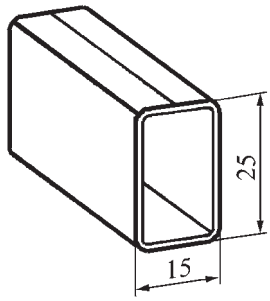


Рис. 1. Профиль замкнутого типа – труба 15×25×1,2

кладывались нагрузки. Пуансон и матрицу задавали как абсолютно жесткие (Rigid) тела, с конечно-элементной сеткой только на их поверхности, используя элемент Shell 163.

Для материала профиля выбрали пластическую кинематическую модель (*MAT_PLASTIC_ KINEMATIC) с коэффициентом разрушения и типом конечного элемента Solid 164 с одноточечной редуцированной схемой интегрирования по объему с контролем Hourglass 4.

Характеристики материала профиля:

Плотность, т/м^3	$7{,}85\cdot10^{-9}$
Модуль Юнга, МПа	$2\cdot10^5$
Коэффициент Пуассона	0,3
Предел текучести, МПа	250
Касательный модуль, МПа	430
Скорость деформации, с$^{-1}$	40
Параметр скоростного упрочнения	5
Главная деформация при разрушении	0,3

В качестве критерия разрушения принят критерий превышения допустимой деформации [4]

$$\varepsilon_1 \geq \varepsilon_{пр},$$

где ε_1 – максимальная главная деформация; $\varepsilon_{пр}$ – главная деформация при разрушении.

Величина $\varepsilon_{пр}$, найденная экспериментально путем одноосного растяжения, для стали 08ю составила 30 %.

Для создания контактных поверхностей между инструментом и профилем использовали тип контакта Automatic surface-to-surface contact (ASTS), а также Automatic general (AG) – для самоконтакта профиля.

Заданы соответствующие условия ограничения профиля от смещения и условия ограничения на симметрию штампа.

Далее введенные параметры передавались решателю Ls-dyna. Расчет одной модели занимал около 2 ч (Pentium D 3200 с оперативной памятью 1 Гб). Затем данные поступали в постпроцессор Ansys, где были представлены следующие результаты:

– форма торца профиля и вырубленной части после рубки различными видами ножей (рис. 4, см. обложку);

– график сил, действующих на нож при рубке (рис. 5).

Выявлено, что наименьшее отклонение (1,8 мм), т.е. искажение формы торца профиля, дает нож № 3, а минимальную силу отрезки (10 кН) – нож № 4.

Моделирование позволило выделить следующие основные этапы рубки профиля:

– внедрение ножа в профиль и пластическое деформирование его элементов до момента разрушения;

– начало отделения краевых отходов и отделение центрального отхода;

– внедрение пуансона в нижнюю горизонтальную часть профиля;

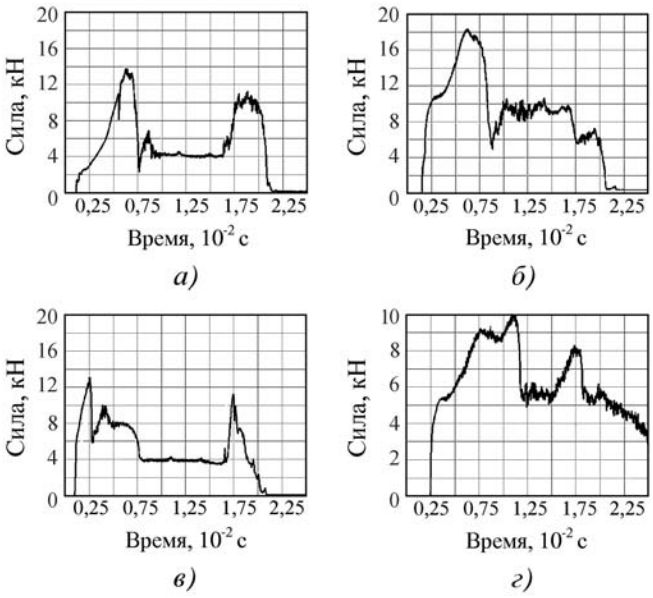


Рис. 5. Силы на пуансоне при рубке ножами:
а – № 1; *б* – № 2; *в* – № 3; *г* – № 4

– полное отделение отходов.

На основании проведенных исследований сделаны следующие выводы:

– для рубки профиля замкнутого типа целесообразно использовать форму ножа № 3;

– по расчетной силе рубки профиля можно выбрать пресс по силовым характеристикам, например, диаметр цилиндра пневматического пресса, шток которого воздействует на пуансон штампа;

– наибольшей нагрузке подвергаются "усики" штампа, поэтому необходимо подобрать оптимальный радиус скругления и толщины ножа;

– существует возможность попадания центрального отхода в зазор между пуансоном и матрицей при отрезке нижней части профиля, что может привести к преждевременному износу штампа, поэтому рекомендуется убирать его, например, пневмосдувом.

Для апробации модели и сравнения результатов моделирования с практическими данными в ОАО "Ульяновский НИАТ" был изготовлен штамп с формой ножа № 3 (рис. 6). Для рубки использовали пневматический пресс (рис. 7) с рабочей силой 20 кН.

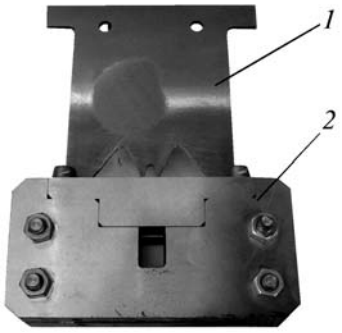


Рис. 6. Штамп для рубки трубы 15×25×1,2:
1 – пуансон; *2* – полуматрица

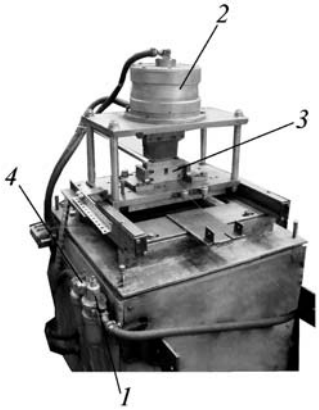


Рис. 7. Пневматический пресс со штампом:
1 – регулятор давления; *2* – цилиндр; *3* – штамп; *4* – манометр

В процессе испытания контролировали следующие параметры:

– сечение торца профиля после рубки;

– форму вырубленной части профиля;

– давление в пневмосистеме в процессе рубки.

Давление измеряли следующим образом (см. рис. 7). Сжатый воздух через регулятор *1* давления постепенно подавали в верхнюю полость цилиндра *2*. Величину давления, при которой происходила рубка профиля в штампе *3*, контролировали по манометру *4*.

Силу на пуансон рассчитывали по известной формуле

$$F = pS,$$

где p – давление, при котором произошла рубка, МПа; S – площадь цилиндра, мм^2.

В зависимости от давления в системе были зафиксированы несколько положений ножа относительно профиля (рис. 8) – прорубание верхней горизонтальной части, нижней и др.

Сравнение результатов испытаний и моделирования процесса показало, что форма сечения профиля и вырубленной части в обоих случаях подобна (рис. 9, см. обложку), а прилагаемые силы отличаются не более чем на 15...20 %. Это свидетельствует о правильном выборе исходной модели и возможности использования программы Ansys/Ls-dyna для исследования

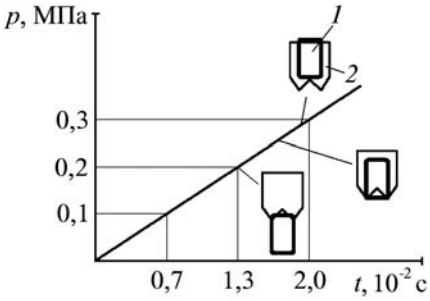


Рис. 8. Положение ножа относительно сечения профиля в зависимости от давления на пуансон:
1 – профиль; *2* – нож

задач рубки профилей различного сечения для подбора рациональной формы ножа, позволяющей минимизировать искажение торца профиля.

Предложенный штамп рекомендуется к внедрению в автоматизированной линии по изготовлению профиля трубы 15×25×1,2. Его применение позволит:

– увеличить на 20...25 % производительность линии, что в первую очередь связано с уменьшением времени отрезки;

– улучшить условия труда за счет снижения уровня шума и исключения частиц абразива в воздухе.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Морозов Е.М., Муйземнек А.Ю., Шадский А.С.** Ansys в руках инженера: механика разрушения. М.: ЛЕНАНД, 2008. 456 с.

2. **Муйземнек А.Ю., Богач А.А.** Математическое моделирование процессов удара и взрыва в программе Ls-dyna: учеб. пособие. Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 2005. 106 с.

3. **Морозов Е.М., Никишков Г.П.** Метод конечных элементов в механике разрушения. Изд. 2-е, испр. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 256 с.

4. **LS-DYNA** Theoretical manual. 2006. Livemore software technology corporation.

Максим Валерьевич Илюшкин, канд. техн. наук;
Владимир Анатольевич Марковцев, канд. техн. наук;
Иван Иванович Лазарев, инженер

УДК 621.77.4

А.А. Филиппов, Г.В. Пачурин *(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева)*

Изготовление калиброванного проката под холодную высадку крепежных изделий из стали 38ХА без обточки поверхностных дефектов

На основе экспериментальных данных предложена новая технология подготовки проката под холодную высадку ответственных крепежных изделий из стали 38ХА для двигателей автомобилей, позволяющая снизить их металлоемкость и повысить экологичность технологического процесса.

The new technology of rolled metal preparation for cold heading of critical fixing wares made of steel 38KhA for cars engines, allowing to lower their steel intensity and to raise manufacturing method ecological compatibility is offered on the basis of experimental data.

Ключевые слова: прокат; высадка; крепежные изделия; сталь; металлоемкость; экология.

Key words: rolled metal; heading; fixing wares; steel intensity; ecology.

К метизным изделиям для двигателей автомобилей предъявляют повышенные требования по поверхностным дефектам – их глубины, наличию обезуглероженного слоя и других.

Перед холодной объемной штамповкой горячекатаный прокат подвергается пластической деформации и снятию недопустимых дефектов поверхности путем дорогостоящей обточки.

На предприятиях, изготовляющих крепеж для двигателей автомобилей, часто применяют горячекатаный прокат из стали 38ХА диаметром 12,0 мм (готовый размер калиброванного проката 9,65 мм) и следующую технологию его переработки:

– сфероидизирующий отжиг в камерной печи с выдвижным подом при температуре 750 °С (общее время отжига 24 ч);

– травление металлопроката до полного удаления окалины;

– калибрование с диаметра 12,0 мм на диаметр 10,55 мм (степень обжатия 19,1 %);

– обточка с диаметра 10,55 мм на диаметр 9,97 мм;

– калибрование с диаметра 9,97 мм на диаметр 9,65 мм (степень обжатия 6,0 %).

Обточку калиброванного проката проводили для удаления поверхностных дефектов и устранения обезуглероженного слоя. Калиброванный прокат перед холодной высадкой крепежа должен отвечать требованиям ГОСТ 10702–78: $\sigma_в$ = 600 МПа; твердость не более 207 НВ; глубина обезуглероженного слоя не более 0,05 мм; качество поверхности должно соответствовать группе Е ГОСТ 14955–77, т.е. после операции обточки допускаются отдельные риски глубиной не больше половины предельного отклонения по диаметру.

Способность стали к деформированию в холодном состоянии наиболее полно оценивается отношением $\sigma_{0,2}/\sigma_в$. Сталь принято считать пригодной для холодной объемной штамповки при $\sigma_{0,2}/\sigma_в < 0,6$. Если у калиброванного проката отношение $\sigma_{0,2}/\sigma_в > 0,8$, то это свидетельствует о высоком сопротивлении стали холодной пластической деформации. Использование такой стали для холодной высадки приводит к перегрузкам оборудования и снижению стойкости инструмента.

Высокие $\sigma_{0,2}$ и $\sigma_в$, а следовательно, и отношение $\sigma_{0,2}/\sigma_в$ вызваны повышенным наклепом при калибровании и обточке, а также неудовлетворительной микроструктурой, что недопустимо для холодной высадки болтов моторной группы автомобиля.

При обточке поверхности калиброванного проката возникают и другие недопустимые дефекты поверхности. Так, при данной технологической операции резцы с закругленной режущей кромкой в тонком поверхностном слое вызывают появление высоких температур и упрочнение поверхностного слоя с образованием в нем трещин (глубина закаленного слоя 0,15...0,3 мм) и грубых винтовых резов. Плохая центровка калиброванного проката приводит к неравно-

мерному съему металла по окружности, а глубина обезуглероженного слоя на поверхности остается свыше 0,1 мм. При этом по данной технологии переработки 5,5 % металла переходит в стружку.

Статистический анализ показывает, что калиброванный прокат стали 38ХА, изготовленный по существующей технологии, в абсолютном большинстве случаев имеет $\sigma_в$ выше 700 МПа (среднее значение $\sigma_в$ = 780 МПа) и недопустимые значения $\sigma_{0,2}$ > > 640 МПа (среднее значение $\sigma_{0,2}$ = 680 МПа), причем разница по $\sigma_{0,2}$ и $\sigma_в$ при проверке достигает 100... 120 МПа.

Половина проверяемого металлопроката имеет твердость выше допустимой по ГОСТ 10702–78 (более 207 НВ), в большинстве случаев относительное сужение ψ менее 60 %, т.е. ниже допустимого значения. Около 20 % металлопроката имеет глубину обезуглероженного слоя более 0,05 мм, что превышает норму допустимого значения. Более 50 % калиброванного проката по качеству поверхности не отвечает требованиям ГОСТ 14955–77. По микроструктуре только половина металла после отжига соответствует требованиям НТД из-за неравномерности прогрева садки металла в рабочем пространстве нагревательной печи.

Для исключения указанных недостатков проведено исследование возможности получения готового калиброванного проката размером 9,65 мм стали 38ХА из горячекатаного проката исходного диаметра 14,0 мм без механической обточки по следующей технологии:

– отжиг горячекатаного проката с нагревом ТВЧ (токи высокой частоты) при температуре 760...780 °С;

– травление металлопроката до полного удаления окалины;

– калибрование с диаметра 14,0 мм до диаметра 12,5 мм (степень обжатия 20 %);

– отжиг с нагревом ТВЧ при температуре 760...780 °С;

– травление металлопроката до полного удаления окалины;

– калибрование с диаметра 12,5 мм до диаметра 11,0 мм (степень обжатия 22 %);

– отжиг с нагревом ТВЧ при температуре 760...780 °С;

– травление металлопроката до полного удаления окалины;

– калибрование проката с диаметра 11,0 мм до диаметра 9,65 мм (степень обжатия 23 %);

– отжиг с нагревом ТВЧ при температуре 760...780 °С;

– травление металлопроката до полного удаления окалины;

– окончательное калибрование через фильер диаметром 9,65 мм (в пределах упругой деформации).

Суммарное обжатие составляет 65 %. Травление образцов горячекатаного проката данной стали диаметром 14,0 мм, а также травление образцов после отжига с нагревом ТВЧ проводили в соляной кислоте при температуре 63...67 °С. Следует отметить, что после отжига с нагревом ТВЧ на поверхности проката возникает незначительный слой окислительного налета, который удаляется в соляной кислоте в течение нескольких секунд.

1. Химический состав, % мас., стали 38ХА

C	Mn	Si	P	S	Cr
0,39	0,64	0,20	0,026	0,017	0,9

Для изучения микроструктуры, твердости, механических свойств, глубины обезуглероженного слоя и качества поверхности проката стали 38ХА на основных этапах вышеуказанной технологии от бунта отбирали по 5 образцов.

Химический состав горячекатаного проката стали 38ХА диаметром 14,0 мм соответствует ГОСТ 10702–78 и приведен в табл. 1.

Механические свойства, микроструктура, глубина обезуглероженного слоя и качество поверхности горячекатаного проката стали 38ХА диаметром 14,0 мм приведены в табл. 2 и 3.

2. Механические свойства горячекатаного проката стали 38ХА

Номер образца	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	ψ, %	НВ
1	427	806	56,6	229
2	419	793	55,7	229
3	441	815	54,7	232
4	425	807	57,4	231
5	438	810	56,3	232

3. Микроструктура, глубина обезуглероженного слоя и качество поверхности горячекатаного проката стали 38ХА

Номер образца	Микроструктура	Глубина обезуглероженного слоя, мм	Качество поверхности
1	Перлит сорбитообразный и пластинчатый + разорванная сетка феррита	До 0,1 (местное частичное обезуглероживание)	Риска глубиной до 0,1 мм
2		Нет	Дефектов нет
3			
4		До 0,1 (местное частичное обезуглероживание)	
5		Нет	Риска глубиной до 0,1 мм

4. Механические свойства горячекатаного проката стали 38ХА после отжига с нагревом ТВЧ

Номер образца	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	ψ, %	НВ
1	370	740	69,0	199
2	367	723	70,0	198
3	381	745	68,0	200
4	370	734	70,0	199
5	377	743	69,0	201

5. Микроструктура и глубина обезуглероженного слоя горячекатаного проката стали 38ХА после отжига с нагревом ТВЧ

Номер образца	Микроструктура	Глубина обезуглероженного слоя, мм
1	Перлит сорбитообразный мелкодисперсный и участки мелкопластинчатого перлита + + равномерно распределенный феррит	До 0,1 (местное частичное обезуглероживание)
2		Нет
3		До 0,1 (местное частичное обезуглероживание)
4		
5		Нет

Из табл. 2 и 3 следует, что горячекатаный прокат стали 38ХА диаметром 14,0 мм имеет неравномерные механические свойства, частичное обезуглероживание и риски на поверхности.

Механические свойства, микроструктура и глубина обезуглероженного слоя горячекатаного проката стали 38ХА диаметром 14,0 мм после отжига с нагревом ТВЧ приведены в табл. 4 и 5.

Анализ результатов экспериментов показал, что после отжига с нагревом ТВЧ микроструктура горячекатаного проката становится мелкодисперсной и более равномерной по сравнению с микроструктурой исходного горячекатаного проката. Такое изменение структурного состояния приводит к снижению прочностных характеристик, твердости и повышению пластичности: $\sigma_в$ снижается на 60...90 МПа; $\sigma_{0,2}$ снижается на 40...70 МПа; ψ повышается от 11 до 13 %; твердость снижается на 30...32 НВ.

Такой металлопрокат пригоден для дальнейшего калибрования.

Механические свойства, микроструктура и глубина обезуглероженного слоя при изготовлении калиброванного проката из стали 38ХА по различным стадиям передела приведены в табл. 6.

С увеличением числа отжигов ТВЧ при температуре 760...780 °С после холодной пластической деформации калиброванием наблюдается значительное изменение микроструктурного состояния. Сорбитообразный перлит становится менее дисперсным, а после отжига ТВЧ на промежуточном диаметре проката 11,0 мм в микроструктуре появляется мелкозернистый перлит.

После четвертого отжига ТВЧ на окончательном диаметре 9,65 мм достигается формирование равно-

6. Механические свойства, микроструктура, глубина обезуглероженного слоя калиброванного проката стали 38ХА на разных стадиях передела по предлагаемому технологическому процессу

Номер образца	Механические свойства				Микроструктура	Глубина обезуглероженного слоя, мм
	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	ψ, %	НВ		
Калиброванный прокат ∅ 12,5 мм						
1	840	905	52	224	Не контролировали	0,02 (местное частичное обезуглероживание)
2	830	915	54	228		Нет
3	850	870	52	223		0,03 (местное частичное обезуглероживание)
4	835	885	53	226		Нет
5	845	900	50	221		≫
Калиброванный прокат ∅ 12,5 мм после отжига с нагревом ТВЧ						
1	375	735	65	200	Перлит сорбитообразный мелкодисперсный и точечный + равномерно распределенный феррит	Нет
2	355	705	66	195		≫
3	360	690	66	197		0,03 (местное частичное обезуглероживание)
4	365	705	68	198		Нет
5	355	710	64	196		≫

Номер образца	Механические свойства				Микроструктура	Глубина обезуглероженного слоя, мм
	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	ψ, %	НВ		
Калиброванный прокат ∅ 11,0 мм						
1	800	885	65	217	Не контролировали	Нет
2	810	860	66	218		0,02 (местное частичное обезуглероживание)
3	775	845	67	220		Нет
4	790	840	68	216		≫
5	830	890	64	221		≫
Калиброванный прокат ∅ 11,0 мм после отжига с нагревом ТВЧ						
1	485	715	70	200	Перлит точечный мелкозернистый и сорбитообразный мелкодисперсный + равномерно распределенный феррит	Нет
2	500	695	69	202		≫
3	485	690	72	189		0,02 (местное частичное обезуглероживание)
4	470	675	71	187		Нет
5	510	720	69	210		≫
Калиброванный прокат ∅ 9,65 мм						
1	785	880	67	232	Не контролировали	Нет
2	770	875	69	230		≫
3	795	900	67	230		0,02 (местное частичное обезуглероживание)
4	770	880	69	227		Нет
5	790	870	69	229		≫
Калиброванный прокат ∅ 11,0 мм после отжига с нагревом ТВЧ						
1	405	675	73	194	Перлит точечный и сорбитообразный небольшой дисперсности + равномерно распределенный феррит	Нет
2	390	665	74	190		0,01 (местное частичное обезуглероживание)
3	415	680	69	195		Нет
4	390	655	74	195		≫
5	390	660	74	193		0,02 (местное частичное обезуглероживание)
Калиброванный прокат ∅ 9,65 мм после дополнительной калибровки через фильер						
1	420	690	74	195	Не контролировали	Нет
2	415	685	73	194		≫
3	435	700	70	193		0,02 (местное частичное обезуглероживание)
4	400	680	75	190		Нет
5	420	685	74	191		≫

мерной микроструктуры, состоящей из мелкозернистого и точечного перлита и равномерно распределенного феррита. Твердость калиброванного проката с такой микроструктурой не превышает 194 НВ. Изменяются механические свойства калиброванного проката: снижаются прочностные характеристики и возрастает пластичность.

Трехэтапное калиброваниe и отсутствие окалины после отжига ТВЧ приводит к тому, что значительно повышается качество поверхности калиброванного проката. Важно также, что у данного металлопроката отсутствует эллипсность на окончательном размере.

Калиброванный прокат стали 38ХА, изготовленный по предложенной технологии, в отличие от дей-

7. Сравнение контролируемых параметров калиброванного проката по действующей и предложенной технологии

Контролируемый параметр	Предложенная технология	Действующая технология	ГОСТ 10702–78
Твердость, НВ	192,6	217	Не более 207
Временное сопротивление разрыву $\sigma_в$, МПа	688	770	600
Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	480	660	Не регламентирован
Относительное сужение ψ, %	73,5	59	Не менее 55
Отношение $\sigma_{0,2}/\sigma_в$	0,6	0,85	Не регламентировано
Глубина обезуглероженного слоя, мм	0,02 (местное частичное обезуглероживание)	0,05	Не более 0,05

ствующей технологии, обладает значительно меньшим сопротивлением пластической деформации, более высокой пластичностью и более низкой твердостью. Обезуглероженный слой на данном металлопрокате отсутствует.

Способность калиброванного проката к деформированию в данном случае составляет: $\sigma_{0,2}/\sigma_в = 41/68 = 0,6$. Такой прокат считается пригодным для холодной объемной штамповки.

Сравнение контролируемых параметров калиброванного проката по действующей и предложенной технологии приведено в табл. 7.

Таким образом, на основе анализа экспериментальных исследований показана принципиальная возможность изготовления без обточки калиброванного проката стали 38ХА для холодной объемной штамповки крепежа для двигателей автомобилей.

Вывод

Калиброванный прокат стали 38ХА диаметром 9,65 мм, изготовленный по предлагаемой технологии, обладает высокой способностью к холодному пластическому деформированию и превосходит по всем показателям калиброванный прокат стали 38ХА диаметром 9,65 мм, изготовленный по действующей технологии.

Предлагаемая технология является металлосберегающей и экологически более чистой в сравнении с действующей технологией. Отсутствуют вредные выбросы от камерных печей, где происходит отжиг проката; травильные растворы освежаются реже, так как после отжига проката ТВЧ на нем не образуется плотной окалины.

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

Кондаков А.И., Васильев А.С. **Выбор заготовок в машиностроении**: справочник. 2007. – 560 с., тв. пер., 60×88 1/16
ISBN 978-5-217-03382-9
Цена с НДС 440 руб.

Изложен методический подход и необходимое информационное обеспечение для обоснованного выбора исходных заготовок в условиях современного многономенклатурного машиностроительного производства. Приведены характеристики свойств основных конструкционных материалов и рекомендации по их выбору. Даны сведения об основных видах заготовок и способах их изготовления. Указаны основные критерии и правила выбора заготовок. Изложены различные методики обоснования решений, принимаемых при выборе заготовок. Рассмотрены проблемы автоматизации выбора заготовок на основе современных информационных технологий.

Для специалистов и технологов промышленных предприятий, работников научно-исследовательских учреждений, аспирантов и студентов втузов.

Приобрести книгу можно непосредственно в издательстве "Машиностроение", прислав заявку в отдел реализации по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru; по почте: 107076, Москва, Стромынский пер., 4. ООО "Издательство Машиностроение". Справки по тел. (499) 269-66-00. http://www.mashin.ru

А.И. Беляков, А.А. Беляков, Д. Маццарелли *(ООО "Металлитмаш", г. Коломна),*
А.А. Жуков *(Рыбинская государственная авиационная технологическая академия им. П.А. Соловьева)*

Механические свойства чугуна с шаровидным графитом при повышенных температурах

Рассмотрены физико-механические свойства чугуна с шаровидным графитом марок ВЧ 40, ВЧ 50, ВЧ 60, а также с легирующими элементами (Cu, Ni, Mo, Sn и др.), стабилизирующие различные структуры. Приведены данные по длительной прочности и пределу выносливости различных марок чугунов при повышенных температурах.

Physicomechanical properties of spheroidal graphite iron of grades VCh 40, VCh 50, VCh 60, and also with alloying elements (Cu, Ni, Mo, Sn, etc.), stabilizing various structures are considered. The data on stress-rupture and fatigue limit of varioues irons grades are resulted at the elevated temperatures.

Ключевые слова: чугун с шаровидным графитом; механические свойства; химический состав; длительная прочность; предел выносливости; модуль упругости.

Key words: spheroidal graphite iron; mechanical properties; chemical composition; stress-rupture; fatigue limit.

При выборе марки чугуна с шаровидным графитом (ЧШГ) для деталей, работающих при высоких температурах, учитывают следующие характеристики материала: механические свойства при высоких температурах, стойкость к окалинообразованию, ростоустойчивости и изменению структуры, термостойкость.

ЧШГ используется в качестве конструкционного материала для деталей машин, испытывающих одновременно термические и механические напряжения. Отливки из ферритного ЧШГ успешно эксплуатируются при рабочих температурах до 350 °С.

Однако тенденция развития машиностроения направлена на повышение рабочих температур. В связи с этим встает вопрос о применимости ЧШГ при более высоких температурах эксплуатации (350...500 °С). Химический состав исследованных чугунов приведен в табл. 1.

Испытание чугуна на прочностные свойства производили при температурах 20; 100; 200; 300; 400; 450 и 500 °С. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

При повышении температуры примерно до 400 °С предел прочности при растяжении ЧШГ монотонно незначительно снижается. При более высокой температуре предел прочности снижается более интенсивно.

Отмечено упрочняющее влияние меди – наиболее высокие значения предела прочности получены для чугунов № 11 и 12.

Относительное удлинение перлитных чугунов № 8, 10, 11 и 12 увеличивается при повышении температуры, стабилизируется в интервале 100...300 °С, затем несколько снижается, а при 500 °С становится приблизительно равным значению при нормальной температуре.

Относительное удлинение ферритных чугунов № 1 и 2 остается почти неизменным при повышении температуры до 300 °С, а затем снижается.

В [2] приведены данные по длительной прочности ферритных ЧШГ. Химический состав исследованных чугунов приведен в табл. 3.

Механические свойства чугунов № 1.1, 2.1 и 3.1 при 20 и 450 °С приведены в табл. 4.

Результаты испытаний чугунов № 4.1, 5.1 и 6.1 на механические свойства при различных температурах представлены на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что снижение предела прочности всех чугунов независимо от их химического состава начинается при температуре выше 400 °С. Величины $\sigma_{0,2}$, $\sigma_{0,1}$ и $\sigma_{0,05}$ практически не уменьшаются до 500 °С. Относительное удлинение чугунов № 4.1 и 6.1 начинает возрастать при 400 °С, а чугуна № 5.1 – при 200 °С, что связано, видимо, с влиянием кремния и углерода.

Длительная прочность – прочность материала, находящегося длительное время в напряженном состоянии при высокой температуре. Характеризуется обычным пределом длительной прочности, т.е. напряжением, вызывающим разрушение образца при заданном времени действия нагрузки и температуры.

1. Химический состав, содержание феррита и твердость чугунов для испытаний при повышенных температурах [1]

Номер чугуна	Содержание элементов, % мас.							Содержание феррита, %	HB
	C	Si	P	S	Mg	Mn	Прочие		
1	3,50	2,80	0,033	0,080	0,067	0,15	–	100	155
2	3,52	2,64	0,040	0,006	0,061	0,10	–	100	155
3	3,64	2,52	0,040	0,007	0,042	0,89	0,94 Ni	40	220
4	3,46	2,29	0,037	0,005	0,068	0,86	1,38 Ni	30	228
5	3,21	2,54	0,037	0,011	0,060	0,90	1,72 Ni	10	252
6	3,45	2,75	0,037	0,013	0,048	0,17	0,043 Sn	5	240
7	3,48	2,47	0,037	0,008	0,046	0,12	0,063 Sn	15	220
8	3,48	2,59	0,035	0,004	0,055	0,16	0,076 Sn	5	244
9	3,52	2,43	0,044	0,006	0,076	0,17	0,088 Sn	15	233
10	3,65	2,50	0,035	0,008	0,042	0,21	0,098 Sn	3	240
11	3,28	2,52	0,037	0,009	0,049	0,14	0,73 Cu	5	250
12	3,40	2,42	0,041	0,006	0,059	0,11	0,98 Cu	2	265
13	3,55	2,43	0,039	0,012	0,042	0,12	0,98 Cu	Следы	271

2. Механические свойства чугунов при различных температурах испытаний [1]

Номер чугуна по табл. 1	Температура испытаний, °C																				
	20			100			200			300			400			450			500		
	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %
1	446	336	18,7	429	306	21,6	406	280	19,2	400	279	19,0	400	283	13,2	–	–	–	354	257	10,0
2	423	302	22,5	400	282	23,4	377	248	21,6	369	250	19,1	371	244	13,7	–	–	–	334	245	8,7
3	623	473	8,3	623	420	9,0	586	410	9,8	560	374	10,6	560	425	9,6	529	406	9,3	–	–	–
4	691	506	6,8	651	453	7,6	626	435	9,8	620	403	8,3	591	391	6,9	606	397	9,6	549	376	8,6
5	–	567	3,3	–	–	–	–	462	5,5	–	462	7,3	–	–	–	–	436	–	–	–	6,8
7	683	414	9,1	640	403	10,2	591	357	10,7	591	347	9,8	591	361	8,6	–	–	–	523	340	12,9
8	694	402	10,5	666	372	11,0	666	366	10,1	649	333	10,5	620	349	7,0	–	–	–	611	325	5,0
9	654	438	5,1	640	420	6,8	629	394	8,8	600	377	7,0	586	371	7,0	–	391	7,1	471	380	6,8
10	646	481	3,5	689	409	7,5	654	398	8,6	626	375	8,8	600	432	7,2	586	412	6,6	–	–	–
11	743	491	4,5	746	461	7,5	709	412	8,3	700	413	8,4	694	413	5,9	–	–	–	591	398	5,4
12	786	509	4,8	786	476	6,9	743	434	7,2	720	416	7,7	709	446	4,9	–	–	–	646	448	5,3

3. Химический состав чугунов для испытаний на длительную прочность при повышенных температурах

Номер чугуна	Содержание элементов, % мас.							
	C	Si	Mn	P	S	Mg	Ni	Mo
1.1	3,60	2,40	0,30	0,05	0,006	0,047	–	–
2.1	3,60	2,40	0,30	0,05	0,006	0,045	2,50	–
3.1	3,60	2,40	0,30	0,05	0,006	0,043	–	0,80
4.1	3,63	2,90	0,57	0,05	0,003	0,050	–	1,10
5.1	3,08	2,70	0,45	0,05	0,007	0,035	–	0,65
6.1	3,35	3,00	0,32	0,05	0,005	0,045	–	0,76

4. Влияние температуры на механические свойства ЧШГ

Номер чугуна по табл. 3	Показатели	Температура испытания, °С	
		20	450
1.1	$\sigma_в$, МПа	419	299
	$\sigma_{0,2}$, МПа	282	199
	δ, %	23,6	28,0
	ψ, %	28,8	31,2
	НВ	151	–
2.1	$\sigma_в$, МПа	502	357
	$\sigma_{0,2}$, МПа	397	254
	δ, %	18,8	21,0
	ψ, %	25,5	24,8
	НВ	180	–
3.1	$\sigma_в$, МПа	466	349
	$\sigma_{0,2}$, МПа	309	231
	δ, %	17,9	13,0
	ψ, %	19,8	15,0
	НВ	162	–

На рис. 2 приведены кривые длительной прочности чугунов 1.1, 2.1 и 3.1 в соответствии с табл. 4. При легировании 2,5 % Ni или 0,8 % Mo прочностные свойства чугуна при кратковременных и длительных испытаниях существенно повышаются.

В [3] сделана попытка описать длительную прочность при различных температурах некоторой общей функцией предела прочности при комнатной температуре, которая была установлена на основании данных о кратковременной и длительной прочности трех марок ЧШГ (ВЧ 40, ВЧ 50, ВЧ 65) при температурах 350; 400; 450 и 500 °С.

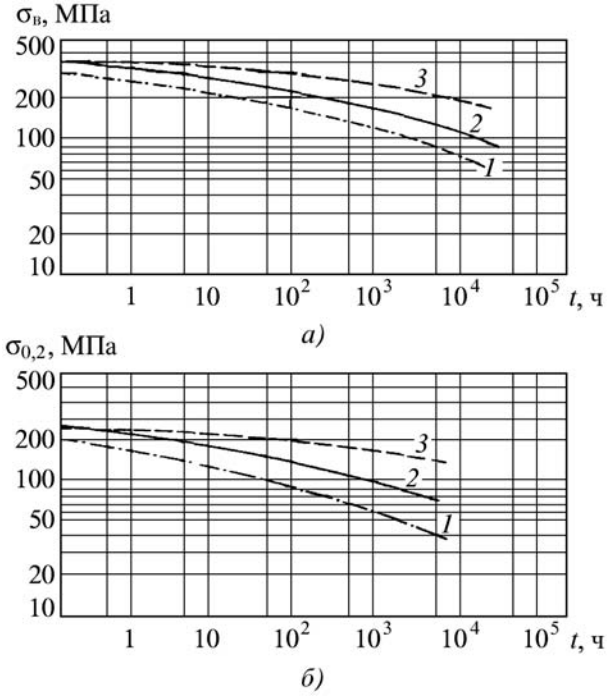


Рис. 2. Влияние легирования на прочностные свойства ферритных чугунов при испытаниях на длительную прочность (при 450 °С):
1 – чугун № 1.1 (без легирования); *2* – чугун № 2.1 (2,5 % Ni); *3* – чугун № 3.1 (0,8 % Mo)

Исследования проводили на образцах и реальной отливки из ЧШГ. Механические свойства, химический состав и структура ЧШГ приведены в табл. 5.

Результаты испытаний на длительную прочность чугуна марок ВЧ 40, ВЧ 50 и ВЧ 65 при различных температурах приведены в табл. 6.

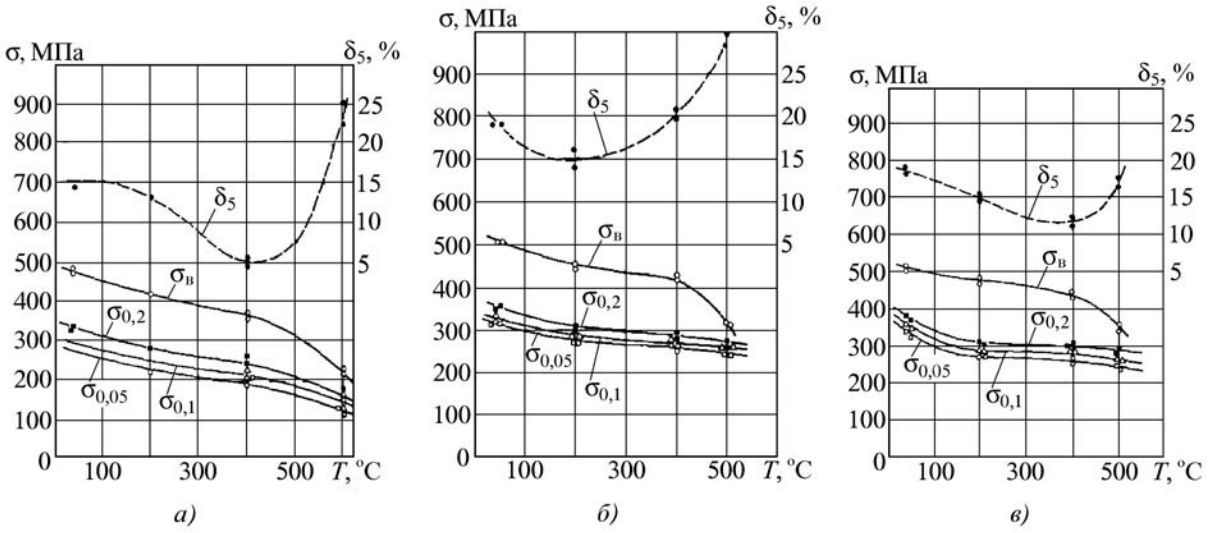


Рис. 1. Механические свойства ЧШГ при различных температурах:
а – чугун № 4.1; *б* – чугун № 5.1; *в* – чугун № 6.1

5. Химический состав, структура и механические свойства ЧШГ для испытаний на длительную прочность

Марка чугуна	Структура	Содержание элементов, % мас.						Механические свойства	
		C	Si	Mn	P	S	Mg	$\sigma_в$, МПа	δ, %
ВЧ 40	Ферритная	3,96	2,89	0,14	0,046	0,023	0,030	423,6	16,5
ВЧ 50	Ферритно-перлитная	3,92	2,49	0,36	0,050	0,012	0,069	516,5	14,7
ВЧ 65	Перлитная	3,89	2,46	0,50	–	0,020	0,120	662,2	2,10
Отливка	Перлитно-ферритная	3,71	1,90	0,35	0,100	0,020	0,065	439,3	4,5

Длительная прочность при заданной температуре описывается функцией вида:

$$\sigma^T = \frac{1}{D}A - \ln\frac{t}{t_0}, \qquad (1)$$

где $t_0 = 1$ ч; A, D – коэффициенты.

В табл. 7 приведены коэффициенты A и D, а также коэффициенты корреляции R. Расчетные значения длительной прочности ЧШГ, полученные по формуле

6. Результаты испытаний на длительную прочность σ^T ЧШГ [3]

Марка чугуна	Температура испытаний, °С							
	350		400		450		500	
	σ^T, МПа	t, ч	σ^T, МПа	t, ч	σ^T, МПа	t, ч	σ^T, МПа	t, ч
ВЧ 40	370	2,5	340	0,5	200	7	200	0,3
	370	3	340	1,2	200	32	200	0,4
	370	6,2	340	4,5	180	32	200	0,6
	360	4,5	300	4	180	55	200	1,9
	360	8	300	5	160	91	160	2,5
	360	9	300	6,5	160	206	160	3,2
	350	29	300	8	140	216	160	4,5
	350	110	280	26	140	873	160	32
	350	163	280	29	120	1085	140	8
	340	94	280	39	120	1480	140	10
	340	254	280	117			140	12
	340	503	260	37			140	14,5
	320	375	260	52			120	6,3
	320	851	260	605			120	11
	310	1800	260	1099			120	12
	310	2450	200	2481			120	39
			180	3606			100	162
							100	165
							80	594
							80	791
							80	893
							80	1060
							70	1440
							70	1776
ВЧ 50	428	0,05	426	0,2	315	1,2	311	0,28
	411	0,17	388	1,5	296	3,3	265	4,6
	380	0,28	361	20	282	1,7	228	28
	368	4,15	354	66	265	116	218	139
	361	526	343	345	248	17	211	49
	349	37,7	337	880	235	145	203	96
	345	389	328	135	218	606	196	29
	342	434	322	1785	210	699	186	64

Марка чугуна	Температура испытаний, °С							
	350		400		450		500	
	σ^T, МПа	t, ч	σ^T, МПа	t, ч	σ^T, МПа	t, ч	σ^T, МПа	t, ч
ВЧ 50	329	1472	312	2169	204	1107	180	60
	319	5500	296	3351	188	3244	172	256
							164	210
							157	604
							133	897
							94	5800
ВЧ 65	610	1,3	500	2,5	350	15	300	4,5
	610	4,5	500	4	350	27	280	12
	610	1,6	500	7	310	27	280	15
	600	1,8	500	7,1	310	165	280	19
	600	3,8	480	7,2	300	36	220	25
	600	17	480	12	300	365	200	87
	585	11	450	91	280	312	200	121
	585	64	450	105	280	1378	200	218
	585	129	450	320	270	83	200	257
	560	54	430	167	270	310	180	277
	560	164	430	214	220	154	180	245
	530	483	430	528	210	3000	180	289
	530	882	420	334	210	4950	180	963
	530	4351	420	370		5380	130	2904
	520	1706	420	406			130	3576
	520	2100	420	550				
			420	1570				
			400	2180				

(1) для $t = 1000$; 5000 и 10000 ч и температур 350 ; 400; 450 и 500 °С приведены в табл. 8.

Модуль упругости – характеристика сопротивления материала упругой деформации. Модуль упругости равен отношению напряжения к вызванной им упругой относительной деформации.

Различают модуль упругости: при осевом растяжении – сжатии (модуль Юнга или модуль нормальной

7. Значения коэффициентов *A*, *D* и коэффициента корреляции *R*

Марка чугуна	Температура испытания, °С					
	350			400		
	A	*D*	*R*	*A*	*D*	*R*
ВЧ 40	41,14	–0,1071	–0,9411	18,86	–0,05478	–0,9168
ВЧ 50	43,92	–0,1117	–0,9346	33,26	–0,08244	–0,9658
ВЧ 65	48,65	–0,0780	–0,9387	30,52	–0,05779	–0,9680
Отливка	21,28	–0,0435	–0,9300	24,38	–0,0697	–0,9705
Марка чугуна	Температура испытания, °С					
	450			500		
	A	*D*	*R*	*A*	*D*	*R*
ВЧ 40	13,89	–0,05607	–0,9508	10,91	–0,05891	–0,9467
ВЧ 50	20,16	–0,06462	–0,9527	12,61	–0,04239	–0,9597
ВЧ 65	15,99	–0,03743	–0,8397	12,52	–0,03619	–0,9638
Отливка	16,43	–0,0583	–0,9605	13,58	–0,06240	–0,9831

8. Результаты расчетов длительной прочности по формуле (1)

Марка чугуна	Длительная прочность, МПа, при температуре испытания, °С											
	350			400			450			500		
	1000	5000	10000	1000	5000	10000	1000	5000	10000	1000	5000	10000
ВЧ 40	319,6	304,6	298,1	218,2	188,8	176,2	124,5	95,8	83,5	67,9	40,6	28,9
ВЧ 50	331,4	316,9	310,7	319,7	300,1	291,7	205,1	180,2	169,4	134,5	96,6	80,2
ВЧ 65	535,4	514,8	505,9	408,6	380,7	368,7	242,6	199,6	181,1	155,1	110,6	91,5
Отливка	330,4	293,4	277,5	250,7	227,6	217,6	163,3	135,7	123,8	106,9	81,1	70,0

упругости); при сдвиге (модуль сдвига); при всестороннем сжатии (модуль объемной упругости).

Из рис. 3 видно, что с повышением температуры модуль нормальной упругости E различных ЧШГ постепенно уменьшается. При 400 °С E снижается до 90 % от значения при 20 °С. Далее снижение E идет несколько более интенсивно и при 700 °С составляет только 71...74 % от значения при 20 °С.

Температурная зависимость изменения E ЧШГ подобна температурной зависимости изменения E углеродистой стали, однако абсолютное значение E ЧШГ ниже, чем у стали.

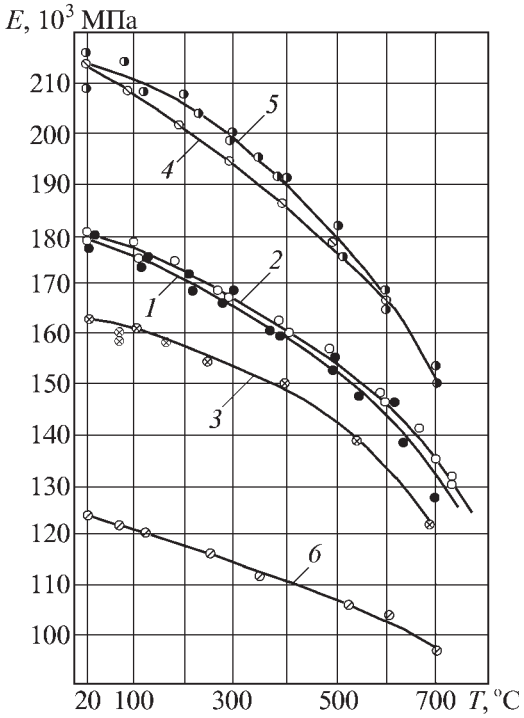


Рис. 3. Влияние температуры испытания на модуль нормальной упругости ЧШГ и сталей [4]:
1 – ВЧ 50; *2* – ВЧ 60; *3* – ВЧ 40; *4* – сталь Ст5; *5* – сталь 45; *6* – СЧ 20

На основании полученных данных определена зависимость между E и температурой T:

$$E_T = E(1 - 0{,}0068 \cdot 10^{-2}\, T - 0{,}0044 \cdot 10^{-4}\, T^2),$$

где E_T, E – модуль нормальной упругости соответственно при температуре T и комнатной температуре.

Зависимость модуля сдвига чугуна ВЧ 60 от температуры приведена на рис. 4.

Коэффициент Пуассона до температуры 200 °С постоянный, а в интервале 200...400 °С от 0,22 до 0,27.

Ударная вязкость – механическая характеристика, оценивающая работу разрушения ненадрезанного или надрезанного образца при ударном изгибе на маятниковом копре.

Кривые зависимости ударной вязкости от температуры (рис. 5) показывают постепенный переход ЧШГ из хрупкого состояния при нормальной температуре в вязкое состояние с повышением температуры испытания. Этот переход начинается от 20 °С и занимает интервал в 100 °С для ферритного чугуна ВЧ 40 и интервал в 200 °С – для перлитных чугунов ВЧ 60 и ВЧ 50.

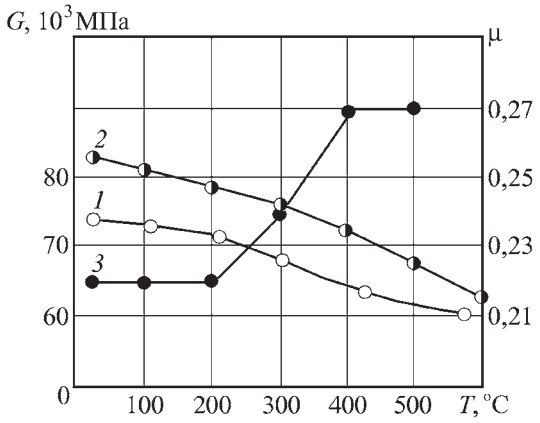


Рис. 4. Влияние температуры испытания на модуль сдвига чугуна ВЧ 60 (*1*) и стали Ст5 (*2*) и коэффициент Пуассона (*3*) ЧШГ [4]

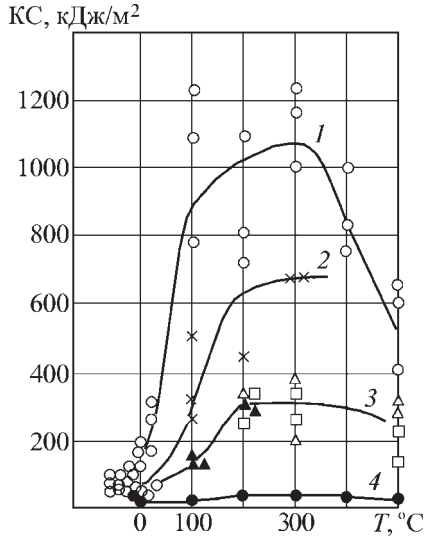


Рис. 5. Влияние температуры испытания на ударную вязкость ЧШГ гладких образцов [4]:
1 – ВЧ 40; *2* – ВЧ 60; *3* – ВЧ 50; *4* – СЧ 20

Для гладких образцов ферритного чугуна ВЧ 40 абсолютное значение ударной вязкости возрастает в критическом интервале температур (переход от хрупкого к вязкому разрушению) от 274,6 до 980,7...1176,8 кДж/м^2 и сохраняется на этом уровне до 300 °С.

Дальнейшее повышение температуры испытания ферритного чугуна снижает ударную вязкость до 833,6 при 400 °С и до 539,4 кДж/м^2 при 500 °С.

Для чугуна в литом состоянии ударная вязкость гладких образцов в критическом интервале температур возрастает в меньшей степени, чем для отожженных на феррит, и для ВЧ 50 в меньшей степени, чем для ВЧ 60 (см. рис. 5, кривые *1*, *2*, *3*). Таким образом, результаты испытаний гладких образцов ЧШГ показывают, что при ударном изгибе повышение температуры переводит ферритный чугун из хрупкого в вязкое состояние.

Для стандартных надрезанных образцов ферритного ЧШГ ударная вязкость в критическом интервале температур возрастает от 49,0 до 245,2 кДж/м^2 и сохраняется на этом уровне до 400 °С.

Предел выносливости – механическая характеристика материалов; наибольшее напряжение цикла, которое материал может выдержать повторно N раз без разрушения, где N – заданное техническими условиями большое число (например, 10^6, 10^7, 10^8).

В работе [4] приведены данные по пределу выносливости, определенном на гладких и с надрезом образцах. На рис. 6–8 показаны экспериментальные кривые выносливости чугунов ВЧ 50 и ВЧ 60 для температур испытания до 500 °С.

С повышением температуры наблюдается общая тенденция понижения предела выносливости чугуна всех марок. Разупрочняющее действие высоких температур проявляется одинаково на гладких образцах чугунов ВЧ 50 и ВЧ 60 как в литом, так и в нормализованном состоянии: повышение температуры до 300 °С снижает предел выносливости ЧШГ на 12...20 %. Повышение температуры до 500 °С снижает предел выносливости на 17...25 %.

Сравнение пределов выносливости и пределов прочности при растяжении для разных температур испытания показывает, что до 300 °С разупрочняющее действие температур при циклической нагрузке значительно больше (12...20 %), чем при статической нагрузке.

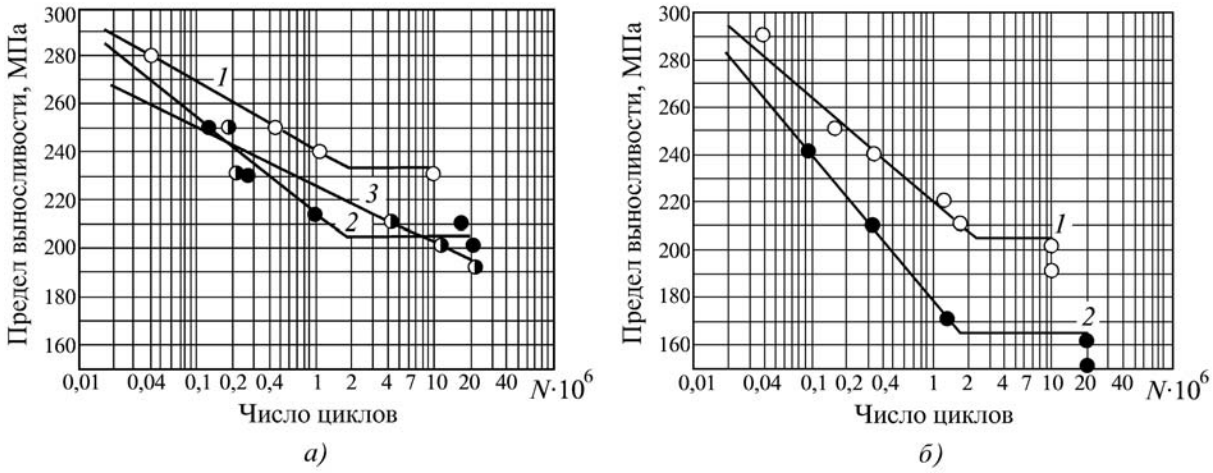


Рис. 6. Кривые предела выносливости чугуна ВЧ 50 в литом состоянии при различных температурах:
а – гладкие образцы; *б* – образцы с надрезом; *1* – 20 °С; *2* – 300 °С; *3* – 500 °С

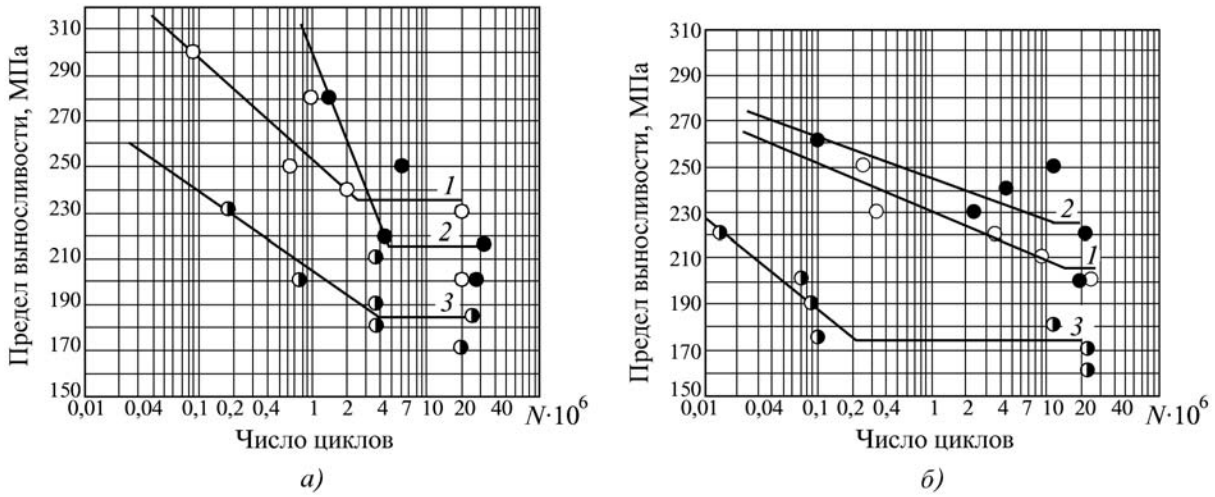


Рис. 7. Кривые предела выносливости чугуна ВЧ 60 в литом состоянии при различных температурах:
а – гладкие образцы; *б* – образцы с надрезом; *1* – 20 °С; *2* – 300 °С; *3* – 500 °С

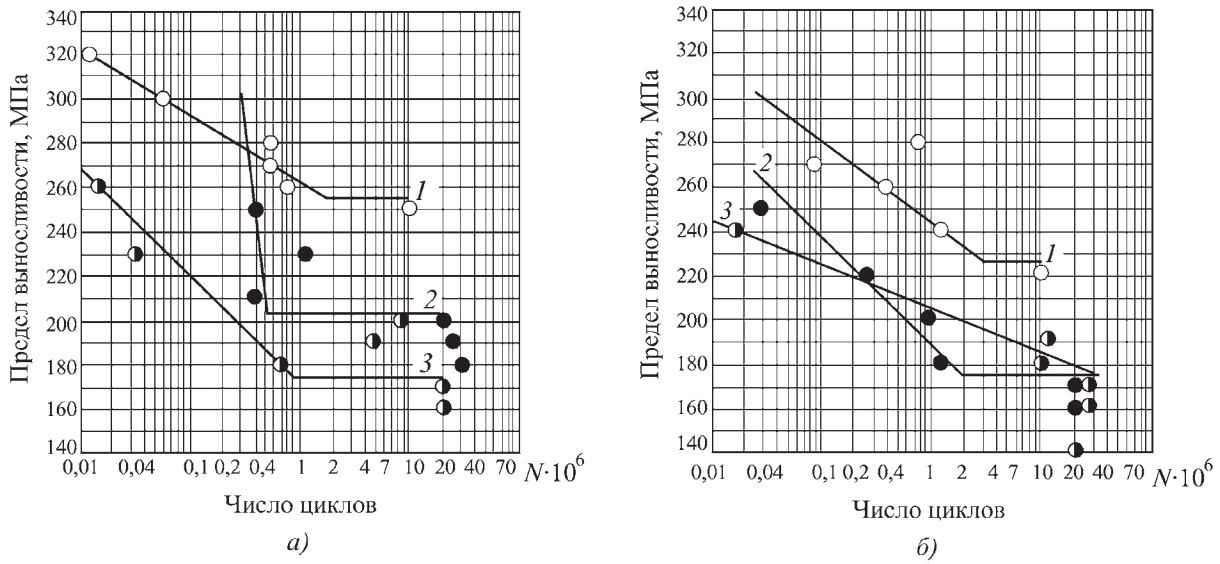


Рис. 8. Кривые предела выносливости чугуна ВЧ 60 в нормализованном состоянии при различных температурах:
а – гладкие образцы; *б* – образцы с надрезом; *1* – 20 °С; *2* – 300 °С; *3* – 400 °С

ЛИТЕРАТУРА

1. **Dilewijns J.A.** Proprietes de fontes nodulaires a des temperatures allant jusqu a 500 °C avec attention speciale a la resilience // Fonderie belge. 1972. 42. № 3. P. 14–19.

2. **Reifferscheid K.** Verbesserung des Zeitstandverhaltens von ferritischem Gusseisen mit Kugelgraphit durch Legieren // Giesserei-Praxis. 1978. № 18. P. 291–294.

3. **Чех М., Яковлюк А., Осипюк В.** Прогнозирование длительной прочности высокопрочного чугуна с глобулярным графитом на основании предела прочности // Проблемы прочности. 1985. № 2. С. 18–22.

4. **Кудрявцев И.В., Савина Н.М., Баранова Н.Б., Балабанов Н.А.** Конструкционная прочность чугуна с шаровидным графитом. М.: Машгиз, 1957. 159 с.

Алексей Иванович Беляков, канд. техн. наук;
Алексей Алексеевич Беляков, инженер;
Джузеппе Маццарелли, член совета директоров завода;
Анатолий Алексеевич Жуков, канд. техн. наук

Р.Н. Палавин, В.Н. Колганов *(НПП "Солитус", г. Нижний Новгород),*
В.А. Коровин, И.О. Леушин *(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева),*
П.П. Степанов, А.С. Киров *(ОАО "Выксунский металлургический завод")*

Повышение эксплуатационной стойкости литых валков горячей прокатки

Показано, что комплексное воздействие (микролегирование ванадием и рафинирование кальцием) улучшает структуру и повышает в среднем на 30 % механические свойства графитизированной стали.

Complex influence (microalloying by vanadium and finishing by calcium) improves structure and raises on the average on 30 % mechanical properties graphitized steel is shown.

Ключевые слова: прокатные валки; графитизированная сталь; микролегирование; рафинирование; ванадий; кальций; структура; физико-механические свойства; эксплуатационная стойкость.

Key words: forming rolls; graphitized steel; microalloying; finishing; vanadium; calcium; structure; physical and mechanical properties; operational durability.

Валки горячей прокатки являются одними из основных деталей, применяемых в металлургической промышленности, для производства широкой номенклатуры изделий. В процессе эксплуатации валки подвергаются интенсивному износу, разрушающее действие которого усиливается нормальными и касательными напряжениями, а также высокой температурой в зоне контакта с прокатываемым изделием.

В результате этого в поверхностных слоях деталей протекают комплексные явления, связанные с перераспределением химических элементов, структурными превращениями, изменением размеров и формы отдельных первичных и вторичных фаз, которые изменяют структуру и свойства материала в рабочей зоне, оказывая значительное влияние на износостойкость валков.

Валки – основной сменный инструмент деформации трубоэлектросварочных станов в ОАО "Выксунский металлургический завод", который во многом определяет конкурентоспособность продукции завода, ее качество и надежность в эксплуатации. Соответственно важная задача – освоение прогрессивных методов литья и внепечной обработки сплавов в технологии получения валков.

Для изготовления валков горячей прокатки применяют различные марки сталей: 50ХН, 55Х, 60ХН, 9Х2МФ и др. Отличительной особенностью перечисленных марок сталей является содержание углерода от 0,4 до 1,0 % и хрома до 2,0 % при низком содержании графитизирующих элементов. Следствием этого является связывание углерода в комплексные карбиды (Fe,Cr)C, что приводит к повышению прочностных характеристик стали и твердости, но в то же время усиливает склонность к возникновению микротрещин в процессе эксплуатации.

Содержание хрома более 1,5 % приводит к формированию карбидов неблагоприятной морфологии, что при отсутствии специальной термохимической обработки (закалка, азотирование) ведет к снижению механических свойств стали и износостойкости вследствие выкрашивания включений карбидной фазы из рабочей зоны валка при эксплуатации. Это приводит к изменению микроструктуры поверхностного слоя валка и ускоряет процесс его разрушения. Указанные марки сталей применяются после обработки давлением, что повышает технологическую сложность изготовления валков.

Одной из альтернатив приведенным маркам сталей могут служить графитизированные стали. Высокие механические свойства, износостойкость и термическая стойкость в сочетании с возможностью производства тонкостенных отливок сложной конфигурации позволяют использовать эти стали для изготовления тяжелонагруженных деталей, работающих в условиях повышенного износа.

Включения графита способствуют повышению износостойкости в условиях трения. Это обусловлено тем, что в процессе износа они выходят на поверхности трения, расчленяются по плоскостям спайности, образуя тонкие пластинки, заполняющие неровности контактирующих поверхностей и предотвращающие сухое трение и схватывание, являясь своеобразной смазкой [1].

Структура литых графитизированных сталей отличается неравномерностью: крупное зерно в сочетании с участками карбидной фазы и включениями графита. Твердость сталей составляет 250...350 НВ.

Для тяжелых режимов трения, которыми характеризуются условия эксплуатации валков, наряду с высокой твердостью нужен еще некоторый запас пла-

стичности. Чем дольше материал способен претерпевать пластическую деформацию без разрушения, тем выше долговечность узла трения. Поэтому возрастает значение таких элементов структуры, как размер и форма зерен, расположение по границам зерен избыточных фаз, общая однородность и измельченность структуры, морфология и распределение фаз, в том числе неметаллических включений [2].

Возникает задача получения однородной мелкозернистой структуры с равномерным распределением графита и карбидов в металлической матрице и снижения содержания неметаллических включений в графитизированной стали для повышения стойкости литых валков горячей прокатки.

Для этого проводили опытные плавки графитизированной стали с микролегированием ванадием и рафинирующей обработкой расплава кальцием.

В качестве базового варианта выбрали два состава графитизированной стали:

1. Сталь, легированная 0,8...1,2 % Si (содержание углерода ~1,0 %);

2. Сталь, легированная 0,8...1,2 % Cr, 0,8...1,2 % Ni и 0,1...0,2 % Mo (содержание углерода ~1,5 %).

Выбранные составы сталей являются широко применяемыми для различных условий эксплуатации в зависимости от типа и интенсивности нагрузок.

Содержание ванадия изменяли от 0,1 до 1,0 %, кальция от 0,01 до 0,1 %.

Выплавку графитизированных сталей проводили в индукционной тигельной печи ИСТ–016 с кислой футеровкой. В качестве шихтовых материалов использовали передельные чугуны, стальные отходы, ферросплавы. Для сравнительных испытаний опытные составы сталей выплавлялись из тех же шихтовых материалов и при одинаковых условиях с базовыми.

Образцы для определения механических свойств (по ГОСТ 977–88) заливались в стержневые формы. После охлаждения, выбивки и очистки образцы подвергали термической обработке (нормализацию) по следующему режиму: нагрев до 880...920 °С, выдержка 4 ч, охлаждение на воздухе.

По результатам опытных работ было определено оптимальное содержание ванадия в составах графитизированных сталей и необходимое для эффективного рафинирования содержание кальция, которые обеспечивают получение однородной мелкозернистой структуры с равномерным распределением графита и карбидов в металлической матрице и снижение содержания неметаллических включений. Как следствие возрос уровень механических свойств опытных составов сталей по сравнению с базовыми:

1. Сталь, легированная кремнием – временное сопротивление при растяжении – на 26...29 %; предел текучести – на 22...28 %; относительное удлинение – на 60...100 %; ударная вязкость – на 47...54 %.

2. Сталь, легированная хромом, никелем и молибденом – временное сопротивление при растяжении – на 19...21 %; предел текучести – на 20...24 %; относительное удлинение – на 50...75 %; ударная вязкость – на 40...43 %.

Достигнутые результаты можно объяснить комплексным воздействием микролегирования и рафинирования на структуру и свойства стали.

Ванадий характеризуется отсутствием *p*-электронов и наличием незаполненных *d*-орбиталей ядра атома, следствием чего является понижение термодинамической активности углерода при вводе ванадия в расплав. Это приводит к процессу образования высокодисперсных соединений ванадия (карбидов, нитридов, карбонитридов), имеющих округлую форму, которые, равномерно распределяясь по границам зерен, измельчают и упрочняют их, повышая прочностные и пластические свойства стали, не вызывая при этом появления напряжений.

Кальций, обладая повышенным химическим сродством к сере и кислороду, очищает границы зерен от неметаллических включений, повышая механические свойства стали. Кроме того, кальций обладает графитизирующим действием, в результате включения графита становятся дисперсными и приобретают благоприятную форму. Избыток кальция ухудшает механические свойства сталей вследствие загрязнения границ зерен продуктами взаимодействия с серой и кислородом.

Таким образом, комплексное воздействие (микролегирование и рафинирование) улучшает структуру и существенно повышает механические свойства графитизированной стали, что приводит к увеличению эксплуатационной стойкости литых валков горячей прокатки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Машиностроение.** Энциклопедия. Т. II-2. Стали. Чугуны / Г.Г. Мухин, А.И. Беляков, Н.Н. Александров и др.; под общ. ред. О.А. Банных и Н.Н. Александрова. М.: Машиностроение, 2000. 784 с.

2. **Марукович Е.И., Карпенко М.И.** Износостойкие сплавы. М.: Машиностроение, 2005. 428 с.

Роман Николаевич Палавин, канд. техн. наук;
Вячеслав Николаевич Колганов, директор;
Валерий Александрович Коровин, канд. техн. наук;
Игорь Олегович Леушин, д-р техн. наук;
Павел Петрович Степанов, начальник научно-технического управления;
Алексей Сергеевич Киров, инженер

В.А. Довыденков *(ООО "Наномет", г. Йошкар-Ола),*
Г.П. Фетисов *(Московский авиационный институт)*

Модель для расчета вязкости композиций порошок–связующее для получения заготовок путем их литья и спекания

Разработана модель и получены аналитические выражения для расчета вязкости композиций порошок–связующее, предназначенных для формования металлических заготовок. Показано хорошее совпадение значений вязкости, полученных экспериментально и расчетным путем.

The model was developed and analytical expressions to calculate viscosity of the composites powder–binder intended for moulding of metal blanks were obtained. Good matching of viscosity values obtained in analytical and experimental ways was shown.

Ключевые слова: модель; вязкость; порошок–связующее; МИМ-технология.

Key words: model; viscosity; powder–binder; MIM-technology.

Вязкость является одной из важнейших характеристик композиций порошок–связующее, предназначенных для формования заготовок с применением МIM-технологии [1].

В настоящее время не созданы аналитические методы расчета вязкости композиции, зная вязкость связующего, количество и свойства порошка-наполнителя [2]. Поэтому разработка моделей, по которым можно определить соотношения между составом композиции и их вязкостью, является актуальной проблемой.

Кроме того, такие модели позволяют лучше понимать физические процессы, происходящие при формовании композиций, а также пути оптимизации их состава и характеристик.

При разработке моделей использовали следующие положения:

– соотношение между силой трения и вязкостью описывается уравнением Ньютона;

– движение в композициях является ламинарным (безвихревым);

– безвихревые поля течения могут складываться путем простого наложения;

– деформация композиций осуществляется взаимным перемещением поверхностей скольжения, в которых частицы твердой фазы расположены равномерно.

Применяли следующие обозначения:

M – масса всех частиц наполнителя в единице объема;

m – масса одной частицы;

D – диаметр частицы наполнителя;

r – радиус частицы наполнителя;

ρ – плотность материала частицы наполнителя;

N_V – количество частиц наполнителя в единице объема;

N_S – количество частиц на единицу площади поверхности скольжения;

S – площадь поверхности скольжения;

F_S – сила трения на поверхности скольжения площадью S;

α – расстояние между поверхностями, соединяющими центры частиц в соседних поверхностях движущихся друг относительно друга;

Δ – расстояние между ближайшими частицами;

γ – доля объема композиций, занимаемая наполнителем;

v_i – скорость движения i-й поверхности скольжения;

η – динамическая вязкость связующего;

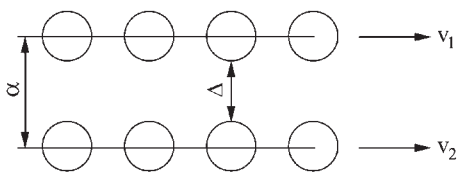
$\eta_к$ – динамическая вязкость композиции.

Рассмотрим вначале самую простую модель, для построения которой приняты следующие допущения:

– наполнитель – твердые частицы шарообразной формы и одного диаметра;

– упаковка частиц наполнителя – простая кубическая;

– течение материала осуществляется путем взаимного перемещения плотноупакованных поверхностей.



Количество частиц наполнителя в единице объема составит:

$$N_V = \frac{M}{m} = \frac{3M}{4\pi r^3 \rho}, \text{ поскольку } m = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho.$$

Аналогично $N_S = (N_V)^{\frac{2}{3}} = \left(\frac{3M}{4\pi r^3 \rho}\right)^{\frac{2}{3}}$.

В установившемся режиме между движущимися с разными скоростями v_1 и v_2 поверхностями возникает сила трения F_S, обусловленная только вязкостью связующего и расстоянием между поверхностями скольжения:

$$F_S = S\eta \frac{v_1 - v_2}{a - 2r}, \quad (1)$$

где $a = \left(\frac{3M}{4\pi r^3 \rho}\right)^{-\frac{1}{3}}$.

После соответствующих подстановок и преобразований получим

$$F_S = \frac{1}{1 - 2r\left(\frac{3M}{4\pi r^3 \rho}\right)^{\frac{1}{3}}} \eta S \frac{v_1 - v_2}{a}. \quad (2)$$

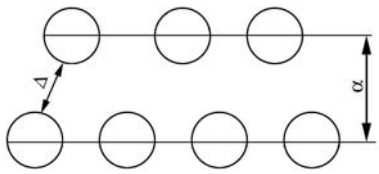
Очевидно, что в выражении (2) множитель перед величиной $S\frac{v_1 - v_2}{a}$ и является эффективной вязкостью композиции $\eta_к$.

Проведя преобразования и вычисления, получаем

$$\frac{\eta_к}{\eta} = \frac{1}{1 - 1{,}242\gamma}, \quad (3)$$

где $\gamma = \frac{M}{\rho}$.

Данная простейшая модель сильно завышает значения вязкости, поскольку существует возможность смещения слоев и частиц в более свободные промежутки, что увеличивает толщину прослоек связующего, участвующего в скольжении.



В данном случае скорости v_1 и v_2 направлены перпендикулярно поверхности листа. В уточненной модели примем, что частицы, находящиеся в плоскости скольжения, расположены в вершинах квадратов, а в сечении, перпендикулярном направлению скольжения, – в вершинах треугольников (гексагональная упаковка, при этом расстояния между частицами всегда равны в плоскостях скольжения и перпендикулярных плоскостях).

Площадь поверхности скольжения в этом случае увеличивается и составляет $S = \frac{1}{\cos 30°}$, а количество частиц в единице объема:

$$N_V = \frac{M}{m} = \frac{1}{(D + \Delta)^3 \cos 30°} \quad (4)$$

и

$$m = \frac{\pi D^3}{6}\rho; \quad (5)$$

$$F_S = \frac{S}{\cos 30°}\eta \frac{v_1 - v_2}{\Delta}. \quad (6)$$

Величину Δ можно определить, решая совместно уравнения (4) и (5):

$$\Delta = D\left[\left(\frac{\pi\rho}{6M\cos 30°}\right)^{\frac{1}{3}} - 1\right]. \quad (7)$$

Далее, подставляя выражение (7) в (6) и учитывая, что в данном случае

$$a = (D + \Delta)\cos 30° = \left(\frac{\pi\rho}{6M\cos 30°}\right)^{\frac{1}{3}} D\cos 30°,$$

получаем

$$F_S = S\eta \frac{v_1 - v_2}{a} \frac{1}{1 - \left(\frac{6M\cos 30°}{\pi\rho}\right)^{\frac{1}{3}}} = S\eta \frac{v_1 - v_2}{a} \frac{1}{1 - 1{,}182\gamma^{\frac{1}{3}}}. \quad (8)$$

Выражение для вязкости композиций в установившемся режиме принимает вид:

$$\eta_к = \frac{\eta}{1 - 1{,}182\gamma^{\frac{1}{3}}}. \quad (9)$$

Расчетные и экспериментальные значения величины $\frac{\eta_к}{\eta}$ для МИМ-фидстока стали 316L

γ	$\frac{\eta_к}{\eta}$	
	Расчет	Эксперимент
0,3	2,3	2,2
0,4	3,2	3,2
0,5	5,1	5,0
0,6	10,0	10,0
0,65	17,7	16,5

Очевидно, что выражение (9) может быть записано в виде

$$\frac{\eta_к}{\eta} = \frac{1}{1-\left(\frac{\gamma}{0{,}605}\right)^{\frac{1}{3}}}.$$

Логично предположить, что вязкость реальных композиций, деформируемых в установившемся режиме, можно выразить следующим образом:

$$\frac{\eta_к}{\eta} = \frac{A}{1-\left(\frac{\gamma}{\gamma_k}\right)^{\frac{1}{3}}}, \qquad (10)$$

где A – коэффициент, определяемый экспериментально; γ_k – критическая степень наполнения, также определяемая экспериментально.

Применим выражение (10) для описания экспериментальной кривой зависимости относительной вязкости $\left(\frac{\eta_к}{\eta}\right)$ от величины γ для МИМ-фидстока стали 316L по данным работы [3]. В данном случае $\gamma_k = 0{,}72$, при $\gamma = 0{,}6$ $\frac{\eta_к}{\eta} = 10$. Подставив эти значения в формулу (10), получим $A = 0{,}59$ и, соответственно,

$$\left(\frac{\eta_к}{\eta}\right) = \frac{0{,}59}{1-\left(\frac{\gamma}{0{,}72}\right)^{\frac{1}{3}}}.$$

В таблице приведены экспериментальные и расчетные значения величины $\frac{\eta_к}{\eta}$.

Таким образом, сравнение экспериментальных данных с рассчитанными по предлагаемой модели показывает их хорошее совпадение, что позволяет рекомендовать применение выражения (10) для расчета вязкости композиций.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Довыденков В.А., Крысь М.А., Фетисов Г.П.** MIM-технология: новые возможности изготовления заготовок // Заготовительные производства в машиностроении. 2006. № 8. С. 47–50.
2. **Jose M. Contreras, Antonia Jimenz-Morales, Jose M. Torralba.** Study of the Rheological Properties of a New Bronze 90/1- Feedstock Based on Irregular Powder Particles for Application in Powder Injection Moulding (PIM) – Powder Injection Moulding International. 2007. Vol. 1. № 3. P. 59–62.
3. **Lars Nyborg, Elisabeth Johansson, Simon Niederhauser.** Assessment of Rheology and Related Properties of PIM feedstock Material // Proc. of Euro PM2000, Feedstock/Debindings. P. 67–74.

Вячеслав Андреевич Довыденков, канд. техн. наук;
Геннадий Павлович Фетисов, д-р техн. наук

Читайте в следующем номере:

- **Арсентьева Н.С., Казанцев Е.А., Железняк Л.М., Дашкевич О.Н., Миллер А.В., Глухова О.Л.** Коллекторные профили для электромашиностроения – высокотехнологичные полуфабрикаты ОАО "Каменск-Уральский завод по обработке цветных металлов"
- **Довыденков В.А.** Вязкость композиций порошок-связующее, в которых твердая фаза состоит из нескольких компонентов различной дисперсности

Промышленные выставки в феврале–мае 2009 г.

Дата проведения	Название выставки	Место проведения	Тематические разделы*
ФЕВРАЛЬ			
10–12 февраля	**Машиностроение. Металлообработка. Металлургия. Сварка – 2009** 7-я Международная специализированная выставка	**Набережные Челны,** ВК "ЭКСПО-КАМА"	Продукция машиностроения, приборостроения. Технологии. Инструменты. Оборудование. Металлообрабатывающее производство. Сварочные материалы. Оборудование. Технологии. Контроль качества сварных соединений
11–13 февраля	**Промэкспо – 2009** 10-я межрегиональная специализированная выставка	**Воронеж,** Театр драмы им. А. Кольцова	Металлургия. Оборудование. Станки. Комплектующие изделия. Оснастка. Инструмент. Приборы. Электронные компоненты и материалы. Промышленная автоматизация
24–27 февраля	**Инновационно-промышленный форум. ПромЭкспо – 2009** 10-я специализированная выставка	**Уфа**	Оборудование и инструмент для промышленного машиностроения. Методы, оборудование и новые технологии обработки металлов. Станки. Инструмент. Неразрушающий контроль в машиностроении. Охрана труда и промышленная экология
МАРТ			
11–13 марта	**ПромТехМаш – 2009** Межрегиональная специализированная выставка	**Белгород,** ВК "Белэкспоцентр"	Технологии, оборудование, материалы для всех отраслей промышленности. Методы контроля качества промышленной продукции. Оборудование, машины и технологии для металлургических комплексов. Технологии и оборудование для сварки и резки металлов
10–13 марта	**Литейное дело – 2009** 9-я Международная специализированная выставка	**Санкт-Петербург,** ВК "Ленэкспо"	Технологии и оборудование для литья под давлением, точного литья, для изготовления форм и стержней. Формовочные материалы. Оборудование для модифицирования литейных сплавов, дозирования и заливки литейных форм. Модельное производство
	Обработка металлов – 2009 7-я Международная специализированная выставка		Первичная механическая обработка металла. Кузнечно-прессовое оборудование, гибочное производство. Лазерное оборудование и технологии. Технологии обработки поверхности металла. Оборудование для термообработки, для нанесения покрытия. Новые материалы и технологии в металлообработке
	Инновационно-промышленный форум – 2009		Международный опыт формирования промышленной политики. Деятельность иностранных промышленных компаний в РФ. Обеспечение конкурентоспособности. Экспорт наукоемкой продукции

Дата проведения	Название выставки	Место проведения	Тематические разделы*
18–20 марта	**Сибзавод – 2009** 9-я специализированная выставка	**Омск**	Оборудование для сварки, резки, наплавки, пайки и термообработки. Специальные виды сварки. Металлопрокат. Технологии, материалы и оборудование в металлургии. Металлорежущее, кузнечно-прессовое оборудование. Ремонт и модернизация технологического оборудования. Инструмент
24–27 марта	**Металлы Сибири – 2009** 11-я Международная специализированная промышленная выставка	**Новосибирск,** МВЦ "Сибирская Ярмарка"	Металлоизделия. Техника. Оборудование. Станки, инструменты и технологии для обработки металла. Сварка, сварочное оборудование. Материалы
24–26 марта	**Евро-Азиатский машиностроительный форум – 2009** Международный форум	**Екатеринбург,** ЦМТ "Екатеринбург"	Станкостроение. Приборостроение. Металлообработка. Инструмент. Подъемно-транспортное оборудование. Строительная техника. Сельскохозяйственная техника. Дорожная техника
24–26 марта	**Металлургия. Машиностроение. Металлообработка – 2009** 9-я специализированная выставка	**Волгоград**	Оборудование. Литейное и прокатное производство. Порошковая металлургия. Сварочное производство, резка, пайка
	АПРЕЛЬ		
7–10 апреля	**Машиностроение. Металлообработка. Сварка. Инструмент. Инновации – 2009** 13-я Международная специализированная выставка	**Челябинск,** РВЦ "ЮжУралЭкспо"	Станочное оборудование, автоматизированные комплексы. Технологии и оборудование заготовительного производства (литейное, кузнечно-штамповочное, ОМД). Порошковая металлургия. Сварочное производство
14–16 апреля	**Сварка. Родственные технологии – 2009** Специализированная промышленная выставка	**Киев,** ВЦ "КиевЭкспоПлаза"	Сварка дуговая, плазменная, контактная, газокислородная, специальные способы. Сварочные роботы, манипуляторы, координатные машины с программным управлением. Заготовительное производство. Машины и технологии термической резки. Сварочные материалы
20–25 апреля	**Литье – 2009** Международная выставка и IX съезд литейщиков	**Уфа,** Дворец культуры "Нефтяник"	Современное оборудование. Приборы. Технологии. Материалы. Системы управления технологическими процессами
	МАЙ		
19–22 мая	**Сварка – 2009** 10-я Международная специализированная выставка	**Минск,** пр. Победителей, 20	Сварочное оборудование, сварочные материалы. Источники питания. Автоматизация сварочных процессов. Оборудование, технологии и материалы для пайки, клепки, склеивания. Контроль качества сварных соединений. Охрана труда и экологическая безопасность в сварочном производстве

* Подробную информацию об основных тематических разделах выставок см. на сайте www.exponet.ru.

Указатель статей, опубликованных в журнале в 2008 г.

Литейное и сварочное производства

Беляков А.И., Беляков А.А., Жуков А.А. Применение чугуна с шаровидным графитом . . . . . № 11
Блинников А.Е. Разработка новых методов конструкторского и технологического управления литейным производством . . . . . № 2
Болдырев Д.А., Давыдов С.В. "Тяжелые" лигатуры для получения отливок из высокопрочного чугуна и их особенности . . . . . № 10
Болдырев Д.А., Давыдов С.В. Внутриформенное модифицирование чугуна с вермикулярным графитом . . . . . № 2
Болдырев Д.А., Давыдов С.В. Экономическая целесообразность применения лигатур, содержащих дефицитный элемент . . . . . № 9
Васильчук М.В. Высокоэффективный ультразвуковой контроль сварных швов методом TOFD . . . . . № 9
Гини Э.Ч. Тенденции развития литейного производства . . . . . № 4
Гитин Ю.М., Рохлин О.Н., Топчий А.В., Ершов Е.И., Курочкина Н.И., Оголь А.В., Кириченко А.М. Опыт механизации кислородной резки кузнечных заготовок в ОАО "Днепропетровский меткомбинат" . . . . № 10
Гуреева М.А., Грушко О.Е., Овчинников В.В., Егоров Р.В. Влияние термообработки на остаточные напряжения, структурно-фазовое состояние и эксплуатационные характеристики сварных соединений сплава 1420 . . . . . № 11
Гуреева М.А., Феклистов С.И., Овчинников В.В., Баженов В.В. Технологические особенности электронно-лучевой сварки фильтров из пористых металлических материалов . . . . . № 6
Давыдов С.В. Кристаллизация шаровидного графита в расплаве высокопрочного чугуна . . . . . № 3
Деев В.Б., Селянин И.Ф., Горюшкин В.Ф., Цецорина С.А., Башмакова Н.В. Технологические приемы снижения горячеломкости литейных сплавов . . . . . № 6
Дубровский С.А., Шипельников А.А., Роготовский А.Н. Наследственные неравновесные структуры в чугунах . . . . . № 12
Ерёмин Е.Н., Филиппов Ю.О., Покровский Д.Г., Лосев А.С., Ерёмин А.Е. Износостойкая наплавка ножей горячей резки металлопроката . . . . . № 4
Ершов М.Ю. Влияние активации глинистых оболочек на качество сырых песчано-глинистых смесей . . . . . № 5
Жуковский С.С., Коршаков А.Г. Синтетические литейные связующие для новых технологических процессов . . . . . № 3
Илларионов И.Е., Кузнецов В.П. Вакуумно-пленочная формовка. История развития и внедрения в отечественной промышленности . . . . . № 10
Карабанов В.В. Эрозионно-растворный процесс при пайке . . . . . № 3
Караник Ю.А. Снижение металло- и энергопотребления при производстве отливок деталей машин и механизмов . . . . . № 2
Коберник Н.В. Изготовление износостойких покрытий аргонодуговой наплавкой композиционного материала алюминиевый сплав АК12М2МгН – частицы SiC . . . . . № 4
Кочергина В.Н., Матыгуллина Е.В., Порозова С.Е. Получение пенокерамических фильтров с модифицирующим эффектом для серого чугуна . . . . № 9
Крайнев А.Ф. Техника литейного производства в историческом и логическом развитии (2-я и 3-я полосы обложки) . . . . . № 2, 4, 6, 9, 11, 12
Кульбовский И.К., Карелин С.В., Илюшкин Д.А., Туркин Д.А. Влияние условий кристаллизации массивных отливок гильз цилиндров судовых дизелей большой мощности на их структуру и свойства . . . . . № 6
Ларионов А.Я. Исследование переохлаждаемости жидких металлов при гомогенном зародышеобразовании . . . . . № 11
Леушин И.О., Ермилин А.С., Рузанкин Д.А., Медведев В.Л. Влияние экзогенной суспензионной разливки на структурообразование высоколегированных чугунов . . . . . № 8
Лясоцкая В.С., Князева С.И. Некоторые виды термической обработки сварных соединений титановых сплавов . . . . . № 5
Миненко Г.Н. Воздействие гидродинамического состояния металлического расплава на условия растворения модификатора . . . . . № 3
Миронов А.С., Маляров А.И. Учебно-научно-технический центр МГТУ "МАМИ" . . . . . № 5
Муратов В.С., Юдаев Д.П. Исследование точечных сварных соединений и определение механических свойств при повышенных температурах листов из алюминиевого сплава 1151 . . . № 9
Овчинников В.В. Пористость при сварке алюминиевых сплавов . . . . . № 1
Огнеупоры неформованные. Методы определения зернового состава по ГОСТ 27707–2007 . . . № 6
Павеле Л.А. Влияние энергетических и газогидродинамических параметров лазерной резки на формирование реза и течение пленки расплава . . . . № 7
Русаков П.В., Богдан К.С., Панащук А.С. Управление процессом центробежного формирования биметаллических отливок . . . . . № 7
Рязанцев В.И., Овчинников В.В. Дуговая сварка жаропрочных алюминиевых сплавов . . . . . № 2
Рязанцев В.И., Овчинников В.В. Циклическая прочность сварных соединений из алюминиевых сплавов . . . . . № 12
Рязанцев В.И., Овчинников В.В., Глотов Е.Б., Кайнов В.М. Сварка литейных алюминиевых сплавов . . . . . № 8
Сапченко И.Г., Жилин С.Г., Комаров О.Н., Предеин В.В. Особенности получения литья из термитных сталей . . . . . № 8
Селянин И.Ф., Феоктистов А.В., Мочалов С.П., Бедарев С.А., Клопов В.И. Геометрические размеры лабораторных вагранок, шихты и топлива . . . . . № 4

Селянин И.Ф., Феоктистов А.В., Мочалов С.П., Бедарев С.А., Клопов В.И. Механика движения материалов в шахтных печах и высота коксовой насадки . . . . . № 9
Семёнов В.И. Измельчение кристаллизационной структуры сплавов путем управления межатомным взаимодействием . . . . . № 11
Семёнов В.И. Структура жидких литейных сплавов . . № 7
Сорокин Ю.А. Особенности проектирования модельной оснастки для автоматизированных формовочных линий опочной и безопочной формовки . . . . № 5
Трухов А.П. 65 лет кафедре "Машины и технологии литейного производства им. П.Н. Аксёнова" МГТУ "МАМИ" . . . . . № 5
Трухов А.П. Линейная усадка и точность размеров отливок в сырых песчано-глинистых формах . . . . . № 1
Трухов А.П. Определение времени охлаждения отливок после выбивки . . . . . № 5
Филинков М.Д. Влияние малых добавок лигатуры Si–РЗМ на газосодержание отливок серого чугуна . . . . . № 9
Фильтры керамические ФКТ (на правах рекламы) . . . № 10
Чернышов Е.А. Зарубежные аналоги алюминиевых литейных сплавов . . . . . № 8
Шатульский А.А., Изотов В.А., Асмамау Тегегне Абебе. Параметры заливки для дождевых литниковых систем . . . . . № 1
Юдин А.В. Расчет контура стабилизации скорости кристаллизации в системе автоматического управления установки направленной кристаллизации монокристаллических отливок . . . . . № 12
Ямпольский В.М. Микроплазменная резка как современный этап развития термической резки тонколистового металла в заготовительном производстве . . № 1

Кузнечно-штамповочное производство

Анненков К.В., Каплунов Б.Г. Совмещенная ковка-штамповка кольцевых поковок . . . . . № 6
Артес А.Э., Третьюхин В.В. Исследование технологических возможностей использования центробежнолитых труб для штамповки деталей в арматуростроении . . . . . № 10
Бочаров Ю.А., Хижнякова Л.В. Параметры тиксоштамповки осесимметричных поковок из алюминиевого сплава А356 . . . . . № 10
Бурлаков И.А. Влияние режимов раскатки на структуру и механические свойства дисков из сплава ВТ9 . . . . . № 5
Бурлаков И.А. Изготовление дисков газотурбинных двигателей из жаропрочных никелевых сплавов с применением физической модели жидкофазного спекания гранул . . . . . № 6
Бурлаков И.А. Особенности изотермической раскатки и ротационной вытяжки заготовок из никелевых сплавов . . . . . № 3
Бурлаков И.А. Ротационная вытяжка деталей газотурбинных двигателей . . . . . № 4
Вдовин С.И. Расчеты гибки труб . . . . . № 2
Виторский Я.М., Дмитриев В.Я., Комаишко С.Г., Кулик Г.Н., Моисей М.В., Суздаль К.В. Освоение производства колен реактора установок для изготовления полиэтилена высокого давления . . . . . № 4
Власов А.В., Дёмин В.А., Субич В.Н., Шестаков Н.А. Моделирование теплопроводности при штамповке деталей из пористых материалов . . . . . № 1
Гойдо М.Е., Бодров В.В., Багаутдинов Р.М. Влияние уравновешивающих цилиндров на работу гидравлического ковочного пресса . . . . . № 12
Гойдо М.Е., Бодров В.В., Багаутдинов Р.М. Выбор значений коэффициентов обратной связи электрогидравлической системы управления подвижной траверсой штамповочного пресса на этапе проектирования . . . . . № 3
Гречников Ф.В., Уваров В.В., Носова Е.А. Экспериментальное исследование показателей анизотропии от деформации . . . . . № 7
Давыдов О.Ю., Егоров В.Г., Танский В.А. Определение энергосиловых параметров штамповки осесимметричных деталей из особотонкостенных труб . . № 2
Езжев А.С., Лёгких А.Н. Экспериментальная штамповка переводников насосно-компрессорных труб . . № 5
Езжев А.С., Белокуров О.А., Лёгких А.Н. Разработка технологического процесса штамповки переводников для насосно-компрессорных труб . . . . . № 4
Езжев А.С., Ковалёв В.Г., Лёгких А.Н. Формование наружной резьбы на трубных заготовках . . . . . № 3
Залазинская Е.А., Залазинский А.Г. Моделирование высокоскоростного вдавливания цилиндрического ударника в деформируемое тело . . . . . № 9
Иванов Ю.В. Амортизаторы подшаботной виброизоляции молотов . . . . . № 11
Ковалёв В.Г. Линии скольжения, характеристики, траектории максимальных касательных напряжений, логарифмические спирали при плоском напряженном состоянии . . . . . № 9
Кокорин В.Н., Филимонов В.И. Моделирование процесса уплотнения увлажненных порошков при высоких давлениях . . . . . № 11
Комаишко С.Г., Комаишко А.Г., Кулик Г.Н., Моисей М.В., Суздаль К.В. Штамповка изогнутого отвода из стали 20 . . . . . № 2
Кошелев О.С., Галкин В.В., Кудрявцев С.А., Хохлов Е.Н., Терещенко Е.Г. Деформация материала в головке болта при холодной высадке . . . . . № 1
Навроцкий А.Г. К 100-летию со дня рождения Г.А. Навроцкого . . . . . № 3
Петриков С.А. Технология изготовления теплообменных поверхностей в трубах для паровых и водогрейных котлов и теплообменных аппаратов . . . . . № 12
Пилипенко О.В., Яковлев С.С., Трегубов В.И. Вытяжка с утонением стенки цилиндрических деталей из двухслойных анизотропных материалов. . . . № 1
Поликарпов Е.Ю., Чудин В.Н. Оценка критических условий горячей гибки с растяжением . . . . . № 7
Потапов А.И. Деформируемость кузнечных слитков и пути ее повышения. Часть 1. Низко- и среднеуглеродистые конструкционные стали . . . . . № 11
Потапов А.И. Механические свойства крупных кузнечных слитков из конструкционных сталей . . . . № 2
Санникова С.М., Крук А.Т. Вопросы выбора однослойной или многослойной трубной заготовки для операции пластического деформирования . . . . . № 1
Семёнов Е.И., Гудов А.А., Иванюк А.В., Сидоров А.А. Определение волокнистого строения поковок типа стержня с плоским фланцем . . . . . № 1

Семёнов И.Е., Рыженко С.Н., Поворов С.В. Моделирование резки тонколистовых заготовок вращающимся эластичным инструментом . . . . . № 10
Сербин А.Г., Сёменов И.Е. Моделирование процесса вырубки листового металла эластичной средой . . . . . № 12
Сидоров А.А. Исследование удельной силы прямого выдавливания деталей типа "стакан" из меди М1 и стали 20 . . . . . № 10
Сурков В.А., Корякин Н.А. Технологические процессы формообразования заготовок деталей газотурбинного двигателя методом штамповки обкатыванием . . . . . № 7
Тяжельников В.М., Каплунов Б.Г. Новая технология штамповки полых поковок высоких ступиц . . . . . № 12
Филиппов А.А., Пачурин Г.В. Разработка конкурентоспособных технологий подготовки хромистых сталей под холодную высадку высокопрочных крепежных изделий . . . . . № 10
Хван А.Д. Штамп двухстороннего действия для осадки с кручением длинномерных цилиндрических заготовок . . . . . № 8
Чудин В.Н., Поликарпов Е.Ю. Изгиб с нагревом элементов оболочек . . . . . № 5
Шейман Е. Прессование через коленообразный канал . . . . . № 6
Шинкаренко О.М., Корчак Е.С. Повышение кавитационной стойкости дроссельных регулирующих клапанов управления гидравлическими прессами . . . № 8

Прокатно-волочильное производство

Бурлаков И.А. Производство прутков круглого и шестигранного сечения из титановых и никелевых сплавов на прокатном комплексе "280-380" . . . . . № 10
Голенков М.А., Зинягин А.Г. Методика расчета времени охлаждения проката и размеров холодильников прокатных станов . . . . . № 11
Калягин Ю.А., Лукин С.В., Образцов М.А. Исследование теплообмена в зоне вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок . . . . . № 2
Касаткин Н.И., Белов В.Г. Разработка калибровки валков для прокатки длинномерных прямоугольных труб с круглым отверстием на станах холодной прокатки труб . . . . . № 8
Колесников А.Г., Мечиев Ш.Т., Панова И.Ю. Состояние и перспективы применения многослойных металлических заготовок . . . . . № 1
Осадчий В.Я., Ковалёв Д.А. Динамическое моделирование поперечно-винтовой прокатки сплошной заготовки в трехвалковом стане методом конечных элементов . . . . . № 5
Пасечник Н.В., Родинков С.В., Горлова А.А. Современные тенденции развития прокатного оборудования для производства строительной арматуры . . . . № 1
Пасечник Н.В., Родинков С.В., Кривенцов А.М., Соломичев Н.В., Семенцул Р.В., Аксёнов В.В. Влияние конструктивных параметров оборудования и технологии прокатки на точность сортовых профилей . . . . . № 6
Поляков Б.Н. Особенности режима двухслитковой прокатки на блюмингах . . . . . № 7
Сёмин В.А., Сёмин П.В. Исследование теплообмена между пинолями и заготовкой при горячей раскатке дисков из сплавов титана . . . . . № 9
Сёмин П.В., Сёмин В.А. Определение площади пятна контакта ролика с заготовкой при горячей раскатке дисков из титановых сплавов . . . . . № 12
Филимонов С.В., Филимонов А.В., Филимонов В.И. Конструктивная технологичность гнутых профилей и узлов на их основе . . . . . № 12
Филимонов С.В., Филимонов В.И., Филимонов А.В. Автоматизированные линии производства гнутых профилей . . . . . № 4
Филиппов А.А., Пачурин Г.В. Анализ поверхностных дефектов заготовок горячекатаного проката для холодной высадки метизов . . . . . № 5
Филиппов А.А., Пачурин К.Г., Пачурин Г.В., Гущин А.Н. Ресурсосберегающая технология подготовки калиброванного проката под холодную высадку изделий . . . . . № 3

Материаловедение и новые материалы

Ампилогов А.Ю., Быков Ю.А., Третьяков В.И. Прогноз образования структур при закалке стальных деталей . . . . . № 6
Баранова А.Н., Горшкова Т.А. Влияние различных режимов термической обработки на твердость стали 07Х16Н4Б . . . . . № 9
Беляков А.И., Беляков А.А., Жуков А.А. Изотермическая закалка чугуна с шаровидным графитом . . . . . № 1
Верденский В.Б., Овчинников В.В., Алексеев В.В., Козлов Д.А., Лопаткин А.И., Козякин А.А. Влияние бронзового покрытия, наносимого электроискровым методом, на физико-механические свойства цилиндрических заготовок из стали 30ХГСН2А . . . . . № 5
Винокуров Ю.В., Бурдикова Т.В., Сурков В.А. Исследование и разработка технологии изготовления антифрикционных втулок методом порошковой металлургии из легированных порошковых материалов на медной основе . . . . . № 9
Громов В.Е., Ефимов О.Ю., Юрьев А.Б., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф. Физическая природа термомеханического упрочнения арматуры большого диаметра . . . . . № 1
Деев В.Б., Селянин И.Ф., Нохрина О.И., Башмакова Н.В. Влияние температурной обработки и электрического тока на свойства алюминиевых сплавов . . . . . № 4
Дубровский С.А., Шипельников А.А., Петрикин Ю.Н. Дендритная наследственность шихтовых материалов . . . . . № 2
Ерёмин Е.Н., Филиппов Ю.О., Ерёмин А.Е., Лосев А.С. Дендритная ликвация и структура жаропрочного сплава, модифицированного ультрадисперсными частицами тугоплавких соединений . . . . . № 2
Ефимов О.Ю., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Коновалов С.В. Эволюция наноразмерной субструктуры и фазового состава при эксплуатации плазменно-упрочненных чугунных валков . . . . . № 10
Злепко Е.В., Чернышевич Е.Г., Кисиленко В.В. Влияние термовременной обработки и раскисления расплава отходов доменного чугуна на эффективность его внепечной десульфурации . . . . . № 8
Кимстач Г.М., Щапов В.А. Особенности структурообразования в расплавах системы Al–Si . . . . . № 9

Комарова Т.В., Скуднов В.А., Гаврова М.Н. Уменьшение неравномерности механических свойств пружинной термически обработанной проволоки . . . № 7
Ли Яцзян, Пучков Ю.А., Герасимов С.А., Ма Хай Цжин, Ван Джуан. Микроструктура и свойства сварного соединения интерметаллида Fe_3Al с аустенитной коррозионно-стойкой сталью . . . № 6
Михеев Р.С., Чернышова Т.А. Дискретно армированные композиционные материалы системы Al–TiC (обзор) . . . № 11
Осадчий В.Я., Бабурин М.А., Екимова Е.Г. Влияние низких температур на пластичность стали 12Х25Н16Г7АР . . . № 3
Поварова К.Б., Дроздов А.А., Алымов М.И. Тяжелые вольфрамовые сплавы, полученные из нанопорошков . . . № 4
Попов В.С., Скоробогатых В.Н., Щенкова И.А. Исследование влияния режимов термической обработки на свойства высокохромистых сталей для энергетических установок . . . № 3
Пряничников В.А., Герасимов С.А., Сивков В.Л. Высокопрочная теплостойкая сталь многоцелевого назначения для изготовления высоконагруженных деталей машин . . . № 12
Пучков Ю.А., Нгуен Ш.Х., Ван Янлун, Березина С.Л., Седова Л.А. Исследование напряженного состояния и коррозионной стойкости пресс-форм из алюминиевых сплавов . . . № 12
Тарасов А.Н., Павловский Н.Р., Ткачевская Г.Д. Карбонитрирование формообразующего инструмента в порошковых смесях на неспециализированном оборудовании . . . № 7
Фигуровский Д.К. Горячая деформация слитков сплава МНЦ15-20, полученных с использованием электромагнитного перемешивания в процессе кристаллизации . . . № 10
Шатульский А.А., Шаповалова М.А. Разработка методов направленного изменения структуры и свойств жаропрочных никелевых сплавов . . . № 8

Информация

Арсентьева Н.С., Сулицин А.В., Казанцев Е.А., Железняк Л.М., Марущак Л.Н., Глухова О.Л. Производство сварочной проволоки в ОАО "Каменск-Уральский завод по обработке цветных металлов" . . . № 6
Большаков Н.С., Сметанин С.В. Исследование технологического процесса ломки прутков на заготовки произвольного сечения . . . № 8
Волохин А.И. Доклад "О состоянии и перспективах развития кузнечно-прессового машиностроения в России" . . . № 8
Гуревич Ю.Г. Использование отходов коррозионностойкой стали для изготовления карбидостали TiC–Х18Н10Т . . . № 12
Гуревич Ю.Г. Что такое булат? . . . № 5
Иванов С.Я. Особенности литниково-питающих систем в ювелирном производстве . . . № 11
Иванов С.Я. Влияние температуры заливки на усадочные процессы при литье золотосодержащих сплавов . . . № 10
Каменарович М.Б. Улучшение прочностных свойств деталей при наложении электромагнитного поля . . . № 3
Каменарович М.Б. Влияние электромагнитного давления и температурного поля отливок на механические свойства и структуру образцов, отлитых в "бегущем" электромагнитном поле . . . № 5
Котельников В.И. Обработка резанием с нагревом наплавленного металла на поверхности детали . . . № 5
Матрицы с квадратным отверстием. Конструкция и размеры по ГОСТ 16642–80 в ред. 2006 г. . . . № 9
Нуждин Г.А., Ляпина Г.И., Самошкин Ю.А., Асанов Г.Н. Вопросы внедрения системы качества предприятия . . . № 12
Оборудование технологическое для литейного производства. Общие технические условия по ГОСТ 10580–2006 . . . № 7
Пожарский А.В., Гулевский В.А. Совершенствование системы обогрева камерной печи с выкатным подом типа СДО при термообработке стальных отливок сложной конфигурации . . . № 7
Расторгуев Г.А. Математическая модель оптимизации раскроя листовых заготовок . . . № 9
Решение Совета директоров предприятий кузнечно-прессового, литейного машиностроения и заготовительных производств – членов Российской Ассоциации "Станкоинструмент" . . . № 3
Указатель статей, опубликованных в журнале в 2007 г. . . . № 1
Филина А.В., Грядунов И.М. Автоматизация сбора и обработки данных при отрезке заготовок от прутковых материала фасонного профиля . . . № 3
Шабашов А.А., Залазинский А.Г. Определение оптимальных режимов калибровки прокаткой композитной электротехнической шины . . . № 7
Юркевич С.Н., Прищепов Е.Г., Полякова Т.Л., Мышковец В.Н. Применение покрытия "блестящий хром" для восстановления ремонтных размеров деталей . . . № 4

Поздравляем!

Бориса Ивановича Семёнова

доктора технических наук, профессора

с 70-летием

Борис Иванович Семёнов родился 6 декабря 1938 г. в г. Москве.

После окончания с отличием МВТУ им. Н.Э. Баумана с 1961 по 1975 г. работал в должности ассистента кафедры "Высшая математика", ассистента, старшего преподавателя и доцента кафедры "Машины и автоматизация литейного производства".

С 1975 по 2001 г. Борис Иванович работал в МГУПИ (бывший ВЗМИ) в должности доцента, профессора, а с 1987 г. – заведующего кафедрой "Композиционные материалы".

С 2001 г. и по настоящее время работает в должности профессора кафедры "Ракетно-космические композитные конструкции" в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В 1968 г. ему присуждена ученая степень кандидата наук, в 1986 г. – ученая степень доктора технических наук.

Борис Иванович Семёнов многие годы ведет преподавательскую и научно-исследовательскую работу в области конструирования и производства изделий из металломатричных композиционных материалов, а также в области инновационных технологий и оборудования точного литья и штамповки металлов и композитов в твердожидком состоянии.

Принципиальной новизной исследований, выполненных под руководством Б.И. Семёнова, является предложенный им системный подход к анализу и математическому описанию накапливаемой поврежденности борной нити при разработке многоступенчатого метода послойного формирования композитных деталей с металлической матрицей, отвечающего требованиям оптимального проектирования.

Новизна научных идей защищена 14 изобретениями. За разработку изделий из металломатричных композиционных материалов Б.И. Семёнов награжден серебряными медалями ВДНХ (1984 г.) и ВВЦ (Архимед-2000).

За успехи в производственной и общественной деятельности Борис Иванович отмечен почетным званием "Отличный работник МВТУ" (1972 г.), нагрудным знаком Минвуза СССР "За отличные успехи в работе" (1988 г.), знаком "Почетный работник Высшего профессионального образования России" (1998 г.), награжден рядом медалей.

Имеет 200 научных работ. Под его руководством защищены 12 кандидатских диссертаций.

Борис Иванович Семёнов – член докторских диссертационных советов в МГТУ им. Н.Э. Баумана и в Институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, член редакционных коллегий ежемесячных научно-исследовательских журналов "Заготовительные производства в машиностроении" и "Технология металлов".

Коллектив редакции и редакционный совет журнала
поздравляют Бориса Ивановича Семёнова с юбилеем!
Желаем крепкого здоровья, творческих успехов
в научной и педагогической деятельности.

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 *Подживотов К.Ю.* Технический редактор *Жиркина С.А.* Корректоры *Сажина Л.И., Сонюшкина Л.Е.*
Сдано в набор 31.10.08 г. Подписано в печать 23.12.08 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 8,32. Заказ 8. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство Машиностроение".
Отпечатано в ООО "Подольская Периодика". 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, д. 15.