ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(Кузнечно-прессовое, литейное и другие производства)

№ 4 апрель 2014

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

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

Зам. Главного редактора
СЕРИКОВА Е.А.

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

Ответственные за подготовку и выпуск номера:
ЛУТОВИНИНА О.Н.
СЕРИКОВА Е.А.

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Литейное и сварочное производства

Болдырев Д.А., Сафронов Н.Н. Влияние фракционного состава графитизирующих и сфероидизирующих модификаторов на их усвоение расплавом чугуна 3

Лебедев В.А., Драган С.В., Голобородько Ж.Г., Симутенков И.В. Управление размерами валика при наплавке под флюсом с поперечными высокочастотными импульсными перемещениями электрода 6

Кузнечно-штамповочное производство

Семёнов И.Е., Горбулинский А.А. Расширение технологических возможностей эластичного рабочего инструмента 11

Хван Д.В., Хван А.Д., Крук А.Т. Восстановление изношенных цилиндрических деталей пластической осадкой 15

Мамаев В.Б., Мамаев М.В. Математическое моделирование напряженного состояния при пластической деформации элементарного объема тела на примере осадки. Часть 3. Инвариантность напряженного состояния 19

Прокатно-волочильное производство

Панин В.Г. Анализ точности раскатных заготовок для кольцевых деталей двигателей "НК" 25

Материаловедение и новые материалы

Жуков А.А., Немтырев О.В., Хасанова Л.А. Исследование коррозионной стойкости сталей для пресс-форм литья под давлением 31

Пахомова С.А., Иванченко В.В. Изготовление конструкционных деталей из металлических отходов 36

Информация

Лыжников Е.И., Давыденко Е.К. Технологический процесс и параметры плоского ножа при резке труб 41

Колесников А.Г. К 110-летию академика Александра Ивановича Целикова 44

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

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

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

© "Издательство "Машиностроение", "Заготовительные производства в машиностроении", 2014

SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

BLANKING PRODUCTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

(Forging and stamping, foundry and others productions)

№ 4 April 2014

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

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

Editorial Assistant
SERIKOVA E.A.

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

This issue prepared with assistance of specialists:
LUTOVININA O.N.
SERIKOVA E.A.

An advertiser is responsible for the promotional materials

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

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

CONTENTS

Foundry and Welding Productions

Boldyrev D.A., Safronov N.N. Influence of fractional structure of graphitizing and spheroidizing inoculants on their assimilation by cast iron melt 3

Lebedev V.A., Dragan S.V., Goloborod'ko Zh.G., Simutenkov I.V. Control of roller sizes due to surfacing submerged with high-frequency switching transverse movement of electrode 6

Forging and Stamping Production

Semenov I.E., Gorbulinsky A.A. Development of technological capabilities of elastic working tool 11

Khvan D.V., Khvan A.D., Cruk A.T. Restoration of worn cylindrical parts plastic upsetting 15

Mamaev V.B., Mamaev M.V. Mathematical modeling of stress state during plastic deformation of body of example precipitation. Part 3. Invariance of stress state 19

Rolling and Drawing Production

Panin V.G. Analysis of accuracy of rolled ring billets for circular engines "NK" 25

Physical Metallurgy and New Materials

Zhukov A.A., Nemtyrev O.V., Khasanova L.A. Research of corrosion resistance of steels for dies for die casting 31

Pakhomova S.A., Ivanchenko V.V. Manufacture of structural parts from metal junk 36

Information

Lyzhnikov E.I., Davydenko E.K. Technological process and parameters of plane blade for cutting of pipes 41

Kolesnikov A.G. By 110th anniversary of academician Alexander Ivanovich Tselikov 44

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", 2014

УДК 669.131

Д.А. Болдырев *(Исследовательский центр ОАО "АВТОВАЗ", г. Тольятти),*
Н.Н. Сафронов *(Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета)*

Влияние фракционного состава графитизирующих и сфероидизирующих модификаторов на их усвоение расплавом чугуна

Рассмотрены особенности усвоения расплавом чугуна и дозировки компонентов графитизирующих и сфероидизирующих модификаторов. Показана высокая перспективность использования для графитизирующей обработки расплава чугуна термо- и механоактивированных комплексных смесевых модификаторов определенной дисперсности. Предложена и проанализирована гипотетическая графическая модель зависимости усвояемость–размер фракции комплексного смесевого модификатора в расплаве чугуна. Предпринята попытка расчетным путем с использованием необходимых производственных показателей и параметров процесса сфероидизирующего модифицирования расплава чугуна оценить требуемый фракционный состав, обеспечивающий наилучшее усвоение магнийсодержащего модификатора.

Ключевые слова: графитизирующие и сфероидизирующие модификаторы; фракционный состав; усвояемость; растворение.

The features of molten iron assimilation components and dosages graphitizing and spheroidizing inoculants are considered. Shows great promise for use graphitizing treatment of molten iron and thermo-mechanically activated complex mixed inoculants specific dispersion. Proposed and analyzed according to hypothetical graphical model digestibility–grain size drop-in integrated inoculant melt iron. Attempt was made by calculation using the necessary performance and process parameters spheroidizing modification of molten iron to evaluate the desired fractional composition, provides the best absorption of magnesium-containing inoculant.

Keywords: graphitizing and spheroidizing inoculants; fractional composition; digestibility; dissolution.

В практике производства отливок из серых чугунов широкое распространение получают смесевые модификаторы графитизирующего действия. На этапе создания и начала использования смесевых модификаторов их в основном изготовляли из вторичных продуктов (отходов) ферросплавных предприятий. В настоящее время для их изготовления требуются новые материалы.

Наиболее эффективными смесевыми модификаторами являются пакетированные смеси (ТУ 0826-003-47647304), в состав которых входят порошки активированного высокотемпературной обработкой графита и кристаллического кремния, полученного новыми физико-химическими способами. В качестве дополнительных составляющих в смесевых модификаторах присутствуют в микродозах кальций, медь, алюминий, РЗМ, железо.

Модификаторы комплексные (МК) представляют собой смесь порошков углеродсодержащего и кремнийсодержащего материалов с содержанием активного углерода не менее 80 % и с содержанием активного кремния не менее 70 %, фракцией менее 2,5 мм. Масса частиц с размерами больше 2,5 мм не должна превышать 10 %.

Отличительной особенностью комплексных смесевых модификаторов является то, что графитизирующие компоненты находятся в высокодисперсном состоянии, что обусловливает резкое повышение модифицирующей способности и живучести смеси.

Согласно [1] идеальными условиями для зарождения графитной фазы является соизмеримость частиц модификатора с кластерами графита. Эти условия реализуются при введении в жидкий чугун смесевого модификатора, содержащего большие количества дисперсных частиц графита и кремния.

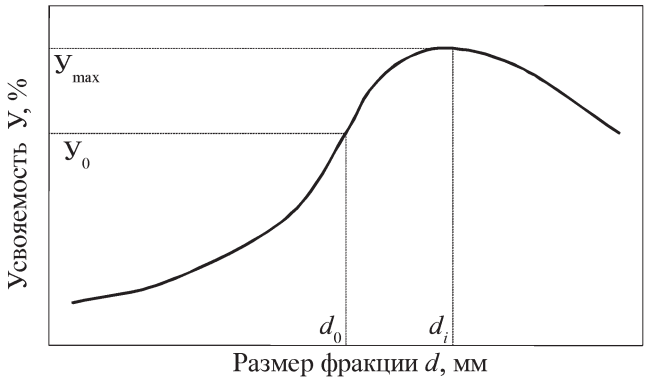
Однако применение смесевого модификатора в производственных условиях представляет собой сложную задачу по определению необходимого соотношения углерода, кремния и других добавок в составе модификатора. На указанное соотношение оказывает влияние множество параметров технологического процесса: состав шихты для приготовления расплава чугуна, типы плавильных агрегатов и последовательность их работы, температура чугуна и др.

Например, если сравнивать между собой ваграночный и электропечной чугуны, то при модифицировании в первом случае смесевой модификатор должен содержать больше графита, чем кремния, и наоборот. Это связано с тем, что кремний по сравнению с углеродом обладает более сильным влиянием на процесс графитообразования.

Углерод и кремний различаются степенью усвояемости жидким чугуном. Промышленные испытания смесевого мелкодисперсного модификатора показали, что усвоение углерода и кремния в расплаве чугуна составило 35 и 50 % соответственно [2], т.е. в мелкодисперсном состоянии углерод усваивается в 1,4 раза хуже, чем кремний.

Усвоение жидким чугуном углерода, кремния и других компонентов модификатора зависит от целого ряда факторов: температуры чугуна, содержания в нем углерода, кремния и других элементов, способа и времени введения модификатора в расплав чугуна, типа плавильного агрегата, состава шихтовых материалов.

Выше было указано, что с точки зрения идеальности условий зарождения графитной фазы в кристаллизующемся чугуне смесевой модификатор должен иметь частицы графита, соизмеримые по размеру с его кластерами. Однако наличие в смесевом модификаторе большого количества графита малой фракции приводит к его низкому усвоению вследствие выноса на поверхность зеркала металла и сгорания на воздухе. С другой стороны, увеличение размера фракции нивелирует эффект кластерного зарождения включений графита.



Графическая модель зависимости усвояемость–размер фракции:

$У_0$, d_0 – критические усвояемость и размер фракции компонентов модификатора; $У_{max}$ – максимальная усвояемость модификатора

На рисунке представлена графическая модель зависимости усвояемости смесевого модификатора от размера фракции его компонентов.

Характерной точкой на этой графической модели является точка с координатами $(d_0, У_0)$. В этой точке $У''(d_0) = 0$, т.е. она является точкой перегиба, переходя которую функция $У = f(d)$, описываемая вогнутой кривой, становится функцией, описываемой выпуклой кривой [3].

При фракции $d < d_0$ возникновение дополнительных центров кристаллизации графитных включений происходит непосредственно из частиц компонентов модификатора: частицы графита гетерогенно формируют его зародыши, а кремнийсодержащие частицы стимулируют образование зародышей графита гомогенно внутри пересыщенных кремнием зон. Однако при этом усвоение модификатора достаточно низкое из-за протекания процессов спекания компонентов модификатора и выноса их на поверхность расплава чугуна.

При $d = d_0$ происходит смена механизма усвоения компонентов модификатора: усиливается растворение и усвоение кремнийсодержащих компонентов модификатора и понижается эффективность растворения и усвоения графитных частиц. Размер фракции $d = d_0$ является критическим и его величина зависит от ряда таких факторов, как температура, химический состав и наследственность расплава чугуна.

При фракции $d_0 < d < d_i$ эффект возникновения дополнительных центров кристаллизации графитных включений непосредственно из частиц компонентов модификатора постепенно нивелируется. При этом степень усвоения компонентов модификатора расплавом чугуна продолжает повышаться вплоть до $d = d_i$, но с понижением темпа.

В указанном фракционном диапазоне наблюдается существенное усиление роли гомогенного зарождения графитных включений из кремнийсодержащих компонентов смесевого модификатора путем формирования на них твердой корочки чугуна с последующим ее растворением. Роль частиц графита смесевого модификатора в процессе графитизации чугуна снижается в результате замедления их растворения.

При фракции $d > d_i$ усвоение компонентов модификатора снижается ввиду того, что размер фракции кремнийсодержащей и графитной компонент настолько велик, что при данной температуре время нахождения компонент модификатора в объеме расплава чугуна недостаточно для их растворения.

Анализ процессов взаимодействия смесевого модификатора с расплавом чугуна в различных диапазонах фракций дисперсного графита и мелкокристаллического кремния позволяет сделать вывод о том, что для эффективного протекания процесса графитизации по гетерогенному и гомогенному механизмам необходимым условием является улучшение усвоения расплавом чугуна компонентов модификатора при одновременном снижении критического размера фракции.

Для повышения механических и эксплуатационных свойств чугунов важным является не только выделение углерода при их кристаллизации в свободном состоянии в виде графитных включений, но и компактная форма включений.

В этом случае применяют технологию сфероидизирующего модифицирования, заключающуюся во введении в расплав чугуна магнийсодержащего модификатора. На эффективность модифицирования существенное влияние оказывает наличие в жидком чугуне поверхностно-активных элементов, таких как кислород, сера, фосфор. Технологический процесс сфероидизирующего модифицирования определяется множеством факторов, но основными параметрами являются: количество модификатора (лигатуры), вводимого в расплав чугуна, и размер фракции модификатора.

Наиболее проблемным из перечисленных выше элементов, содержащихся в жидком чугуне, является сера, которая препятствует образованию графита компактной формы и с которой магний легко вступает в химическое взаимодействие благодаря особенностям строения электронных оболочек атомов магния – $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$ и серы – $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^4$. У атома серы внешняя 3р-оболочка является незаполненной, поэтому ее атомы, стремясь восполнить дефицит электронов за счет контактирования с атомами магния, образуют с ним прочное соединение MgS.

Количество сфероидизирующей магнийсодержащей лигатуры, вводимой в жидкий металл, определяется исходя из следующих факторов: количество магния, необходимое для нейтрализации серы в чугуне и сфероидизации графита; содержание магния в лигатуре; металлоемкость ковша. Необходимое количество магния, г/100 г чугуна, определяют по формуле

$$Q_{\text{Mg}} = \frac{0{,}75\ \text{S} + 0{,}04}{k}, \qquad (1)$$

где S – содержание серы в модифицируемом чугуне, %;

$\frac{A_{\text{Mg}}}{A_{\text{S}}} = 0{,}75$ – отношение произведения атомных масс магния и серы;

0,04 – количество магния, необходимое для сфероидизации графита, %;

k – коэффициент усвоения магния, k = 0,5...0,6.

Количество лигатуры, %, к массе металла в ковше определяют по уравнению

$$Q_{\text{лиг}} = \frac{Q_{\text{Mg}} \cdot 100}{C_{\text{Mg}}}, \qquad (2)$$

где C_{Mg} – содержание магния в лигатуре, %.

Количество лигатуры, кг, загружаемой в ковш, рассчитывают по формуле

$$P = \frac{M\, Q_{\text{лиг}}}{100}, \qquad (3)$$

где M – масса металла в ковше или металлоемкость ковша, кг.

С учетом (1) и (2) уравнение (3) имеет вид

$$P = \frac{M\,(0{,}75\,S + 0{,}04)}{C_{\text{Mg}}\,k}. \qquad (4)$$

Максимальный размер фракции модификатора определяют из требования равенства времени наполнения ковша и времени растворения лигатуры:

$$t_{\text{нап}} = t_{\text{раст}}. \qquad (5)$$

Время наполнения ковша, с,

$$t_{\text{нап}} = \frac{M}{U_{\text{нап}}}, \qquad (6)$$

где $U_{\text{нап}}$ – скорость наполнения ковша, кг/с.

Среднее время наполнения ковша может быть принято равным 20 с.

Время растворения лигатуры, с, определяется ее количеством P, суммарной площадью поверхности фракции модификатора ΣF и удельной скоростью растворения лигатуры α:

$$t_{\text{раст}} = \frac{P}{\alpha\,\Sigma F}. \qquad (7)$$

Если выразить массу лигатуры как произведение ее плотности на объем, а последний параметр так же, как и суммарную поверхность частиц модификатора, через исходный размер зерен в предположении, что они имеют шарообразную форму, то уравнение (7) преобразуется в вид:

$$t_{\text{раст}} = \frac{\gamma_{\text{лиг}}\, D}{6\,\alpha}, \qquad (8)$$

где $\gamma_{\text{лиг}}$ – плотность лигатуры, кг/м^3;

D – максимальный (исходный) размер зерен лигатуры, м.

Плотность магнийсодержащих лигатур на железокремниевой основе можно принять равной $\gamma_{\text{лиг}} \approx 4600$ кг/м^3, а ее удельную скорость растворения при модифицировании расплава чугуна, имеющего температуру $T \approx 1400...1450$ °С, – α = 0,05 кг/(м^2·с).

В процессе модифицирования расплава чугуна размер зерен модификатора уменьшается от исходного значения D до нуля, поэтому в уравнение (8) необходимо ввести коэффициент 0,5 для параметра D:

$$t_{\text{раст}} = \frac{\gamma_{\text{лиг}}\, D}{12\,\alpha}. \qquad (9)$$

С учетом приведенных выше преобразований условие (5) примет вид:

$$\frac{M}{U_{\text{нап}}} = \frac{\gamma_{\text{лиг}}\, D}{12\,\alpha}, \qquad (10)$$

из которого определяется необходимый размер зерна сфероидизирующего модификатора:

$$D = \frac{12\ \alpha\ t_{\text{нап}}}{\gamma_{\text{лиг}}}. \qquad (11)$$

Расчет по формуле (11) показал, что если сфероидизирующее модифицирование проводится в ковше, емкость которого по расплаву чугуна равна 1 т, то следует применять модификатор с размерами частиц 6,5 мм.

Анализ условий усвоения и растворения в расплаве чугуна графитизирующих и сфероидизирующих модификаторов позволяет сделать вывод о требованиях, предъявляемым к ним по фракционному составу.

Графитизирующий модификатор должен быть достаточно мелкодисперсным с размером частиц, не превышающим 30 мкм. Размер частиц сфероидизирующего модификатора должен быть более крупным (~7 мм), что значительно меньше размера фракции, используемого в практике сфероидизирующего модифицирования (~30 мм).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Гаврилин И.В.** Строение жидкой и твердой фаз в литейных сплавах в твердожидком состоянии // Металлургия машиностроения. 2003. № 6. С. 9–11.

2. **Болдырев Д.А., Чайкин А.В.** Новые смесевые модификаторы для инокулирующей обработки чугунов // Литейщик России. 2007. № 3. С. 32–36.

3. **Жилин Д.М.** Теория систем: опыт построения курса. М.: ЛКИ, 2007. 184 с.

Денис Алексеевич Болдырев, канд. техн. наук,
DA.Boldyrev@vaz.ru;
Николай Николаевич Сафронов, д-р техн. наук

УДК 621.791.03

В.А. Лебедев *(Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев),*
С.В. Драган, Ж.Г. Голобородько, И.В. Симутенков *(Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев)*

Управление размерами валика при наплавке под флюсом с поперечными высокочастотными импульсными перемещениями электрода

Представлены результаты исследования воздействия поперечных высокочастотных импульсных перемещений электрода на геометрию наплавленного валика и технологические характеристики процесса автоматической наплавки под флюсом конструкционных сталей.

Ключевые слова: наплавка; электрод; импульсное перемещение; механический генератор; геометрия валика; производительность расплавления.

The results of research on the effects of pulsed high-frequency transverse movement of the electrode on the geometry of the weld bead and technological characteristics of the automatic submerged arc welding of structural steels are presented.

Keywords: welding; electrode; pulsed movement; mechanical generator; roll geometry; melting performance.

При ремонте изношенных деталей судовых машин и механизмов часто применяют *автоматическую наплавку под флюсом* (АНФ), при которой требуемые качество и однородность наплавленного слоя сочетаются с высокой производительностью процесса. Однако при этом глубина проплавления основного металла больше, чем при других способах наплавки, а доля его участия в наплавке, как правило, достигает 30...50 %.

Снижение указанных отрицательных показателей технологии АНФ при сохранении высокой производительности процесса является актуальной задачей. Для ее решения используют различные методы воздействия на процессы переноса электродного металла через дугу или формирования сварочной ванны, позволяющие управлять геометрией наплавленного валика, а следовательно, и *долей участия основного металла в наплавленном слое* (ДОМ).

Наиболее распространенными являются электрический метод (импульсно-дуговая сварка), механический (вибродуговая наплавка) и магнитный способ воздействия [1–3].

Применение электрического метода связано с использованием сложных и дорогих источников сварочного тока с программированием параметров режима [2], а магнитного – с ограничениями, обусловленными магнитными свойствами и основного и электродного металлов [3].

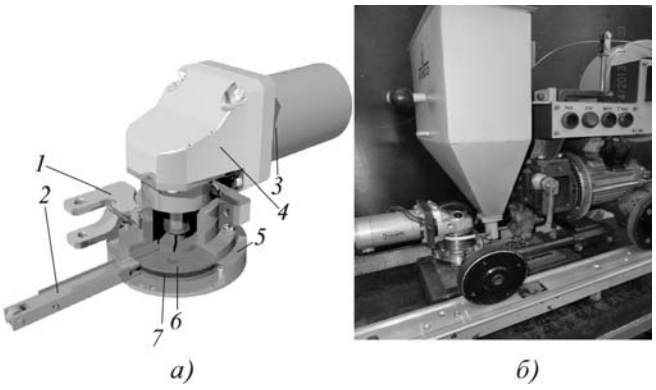


Рис. 1. Конструкция генератора высокочастотных импульсных перемещений электрода (*а*) и его установка на серийном сварочном тракторе (*б*):
1 – крепежный кронштейн; *2* – ударник; *3* – электродвигатель; *4* – редуктор; *5* – корпус; *6* – приводная шайба; *7* – задающие ролики

Перечисленные недостатки, по мнению авторов статьи, не характерны для механического метода, отличающегося простотой реализации с помощью серийного сварочного оборудования. Известно [4], что импульсная подача электродной проволоки или поперечные низкочастотные (до 150 Гц) колебания электрода повышают стабильность горения дуги, улучшают геометрию и структуру сварного шва.

Высокочастотные (500...1000 Гц) малоамплитудные (около 130 мкм) поперечные импульсные перемещения электрода способствуют снижению глубины проплавления и ДОМ также при АНФ [5]. В этом случае эффект достигается в результате периодического принудительного удаления жидкометаллической прослойки с торца электрода при вибрационном воздействии, позволяющем регулировать массу переносимых через дугу капель металла.

Цель статьи – исследование влияния поперечного высокочастотного импульсного перемещения электрода на геометрию валика и производительность расплавления электродной проволоки при однодуговой автоматической наплавке под флюсом конструкционных сталей.

Поперечные высокочастотные перемещения торца *электродной проволоки* (ЭП) создаются с помощью генератора, представляющего собой электромеханический привод (рис. 1), обеспечивающий его работу в двух режимах: межрезонансном и резонансном, с широким диапазоном регулирования частоты импульсного воздействия [5].

Резонансную частоту, при которой частоты импульсного воздействия и собственных колебаний ЭП совпадают, вычисляют по формуле:

$$f_{к\,i} = \frac{d_э}{8\pi}\left(\frac{E}{\gamma}\right)^{0,5}\left(\frac{p_i}{l_в}\right)^2, \qquad (1)$$

где $d_э$, E, γ – диаметр, модуль упругости и плотность металла ЭП соответственно; $l_в$ – длина вылета электрода; $p_i = k l_в$ – корни частотного уравнения, определяемые характером закрепления конца стержня, подверженного колебаниям, т.е. схемой закрепления ЭП в токоподводе сварочного автомата; k – функция Крылова.

Наиболее часто применяемые в серийных автоматах для АНФ токоподводы можно условно объединить в две расчетные схемы, реализующие шарнирное (рис. 2, *а*) или жесткое (рис. 2, *б*) закрепление электрода. Значения первых двух корней частотного уравнения для схемы на рис. 2, *а* равны: p_1 = 3,9266 и p_2 = 7,0685, а для схемы на рис. 2, *б* – p_1 = 1,8751 и p_2 = 4,6941.

Управлять частотой резонанса согласно уравнению (1) можно путем изменения длины вылета или характера закрепления электрода в токоподводе. Так, в диапазоне частот 100...1000 Гц резонансные колебания для электрода диаметром $d_э$ = 2 мм возникают при длине вылета $l_в$ = 25...80 мм, а для $d_э$ = 5 мм – при $l_в$ = 40...150 мм. При этом увеличение длины вылета и жесткости закрепления электрода в токоподводе приводит к снижению частоты резонанса.

В области частот, близких к резонансу, амплитуда колебаний резко возрастает. Увеличение амплитуды перемещения торца ЭП расширяет зону переноса металла через дугу, способствует рассредоточению теплового и силового воздействия дуги на сварочную ванну, вследствие чего глубина проплавления и ДОМ уменьшаются.

Для получения стабильных размеров наплавленного валика необходимо гарантировать условие возврата торца электродной проволоки в исходное положение после импульсного воздействия. Указанное условие выполняется, если амплитуда колебаний $A_к$ в резонансе не превышает предельную (допускаемую) ам-

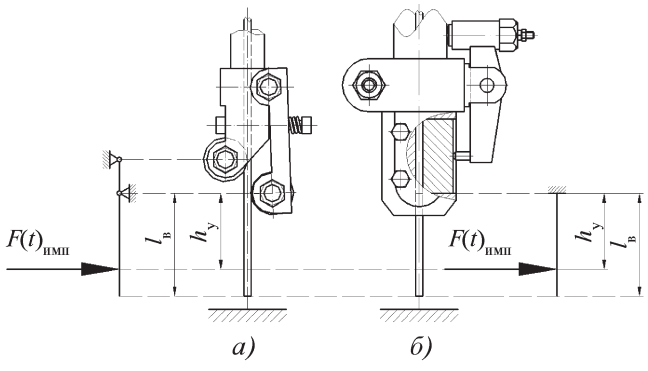


Рис. 2. Типовые конструкции токоподводов сварочных (наплавочных) автоматов и соответствующие им расчетные схемы приложения силы импульсного воздействия $F(t)_{имп}$:
а – с непрерывной компенсацией износа; *б* – с дискретной компенсацией износа; $h_у$ – плечо приложения силы $F(t)_{имп}$

плитуду $[A_к]$, при которой происходит пластическое деформирование ЭП:

$$[A_к] = \frac{2\,\sigma_{т.и}\,l_в^2}{3\,E\,d_э}, \qquad (2)$$

где $\sigma_{т.и}$ – предел текучести материала ЭП при изгибе.

Из формулы (2) следует, что амплитуда $[A_к]$ возрастает при увеличении вылета электрода и предела текучести материала ЭП. Однако увеличение вылета сопровождается ростом нагретого участка ЭП, на котором предел текучести материала снижен. В связи с этим целесообразно ограничиться вылетом ЭП, при котором за счет нагрева, обусловленного проходящим электрическим током, плавится не более 10 % электродного металла (см. кн. Песков Г.И. Электрическая сварочная дуга. М.: Машиностроение, 1970. 335 с.). Вылет в таком случае составляет:

$$l_в = \frac{0{,}1\,K_п\,g_T}{j_э\,\rho}, \qquad (3)$$

где $K_п$ – коэффициент расплавления ЭП; g_T – теплосодержание жидкого металла; $j_э$ – плотность тока в электроде; ρ – удельное электрическое сопротивление материала ЭП.

После подстановки (3) в (2) и преобразований получим

$$[A_к] = 4\cdot 10^{-3}\,\frac{\sigma_{т.и}\,d_э^3}{E}\left(\frac{K_п\,g_т}{I_{св}\,\rho}\right)^2, \qquad (4)$$

где $I_{св}$ – сварочный ток.

Анализ результатов расчета по уравнению (4) позволяет установить следующие закономерности:

• увеличение силы тока при наплавке приводит к уменьшению допустимой амплитуды колебаний торца ЭП, что объясняется перегревом электрода на длине вылета и снижением его упругих свойств. Следствием этого является нарушение стабильности размеров наплавленного валика;

• наплавку проволоками повышенного диаметра из материалов с высоким значением предела текучести можно проводить с большей амплитудой импульсного перемещения электрода. Это обстоятельство следует учитывать при наплавке легированными наплавочными проволоками. Так, использование проволоки Нп-30ХГСА диаметром $d_э$ = 2 мм допускает амплитуду $[A_к]$ = 5...10 мм, а при увеличении диаметра ЭП до $d_э$ = 5 мм допускаемая амплитуда колебаний возрастает до $[A_к]$ = 10...15 мм.

Управлять амплитудой колебания торца ЭП можно также путем изменения частоты импульсного воздействия. По мере увеличения частоты возрастают скорость и ускорение передаточного звена (ударника генератора), что приводит к увеличению инерционной составляющей силы $F(t)_{имп}$.

Указанное предположение подтверждают результаты специального экспериментального исследования. При проведении опытов измеряли длину следа, оставляемого на образце из пластичного материала, колеблющимся заостренным торцом электродной проволоки.

Установлено (рис. 3, *а*), что с увеличением частоты импульсного воздействия амплитуда колебаний возрастает по параболическому закону (штриховая линия). При этом на частотах, близких к резонансу для данного вылета ЭП, наблюдается резкое увеличение амплитуды колебаний.

Амплитуду колебаний торца электрода можно регулировать двумя способами:

1) ступенчато – путем изменения массы ударника генератора или его перемещения в импульсе;

2) плавно – изменяя частоту вращения вала приводного электродвигателя за счет регулируемого электропривода.

Влияние поперечных высокочастотных импульсных перемещений электрода на геометрические характеристики наплавленного валика оценивали по результатам исследований, выполненных на экспериментальном стенде (см. рис. 1, *б*), оснащенном сварочным трактором КА-001 с генератором высокочастотных импульсных перемещений электрода и источником питания КИУ-501.

Наплавку валиков проводили электродной проволокой Св-08А диаметром 2 мм под флюсом АН-348А на пластины толщиной 10 мм из низкоуглеродистой конструкционной стали Ст3сп. В опытах варьировали только частоту импульсного воздействия, оставляя прочие параметры режима сварки неизменными. Стабильность сварочного процесса оценивали по осциллограммам напряжения на дуге, регистрируемого с помощью электронного USB-осциллографа IRIS. Геометрические параметры наплавленных валиков, площади проплавления, наплавки и ДОМ определяли по макрошлифам.

На рис. 3, *б* и *в* представлены результаты, соответствующие импульсному воздействию на ЭП вдоль направления наплавки. При этом значения коэффициента расплавления электрода $K_п$ и глубина проплавления металла h, полученных при наплавке без колебаний ЭП, составили: $K_{п0} = (15 \pm 0{,}5)$ г/(А·ч); $h_0 = (2{,}5 \pm 0{,}5)$ мм. Индекс "0" указывает на отсутствие импульсного воздействия.

Характер изменения указанных параметров зависит от режима импульсного воздействия на электродную проволоку – наличия или отсутствия резонанса. При резонансном режиме наблюдается наиболее значительное изменение формы и геометрических размеров наплавленного валика (см. таблицу).

Максимальное уменьшение глубины проплавления, ДОМ, а также увеличение производительности плавления ЭП достигнуты на главном тоне (первый резонанс) колебательной системы в диапазоне частот $f_{р1}$ = 560...750 Гц. Это хорошо согласуется с резонанс-

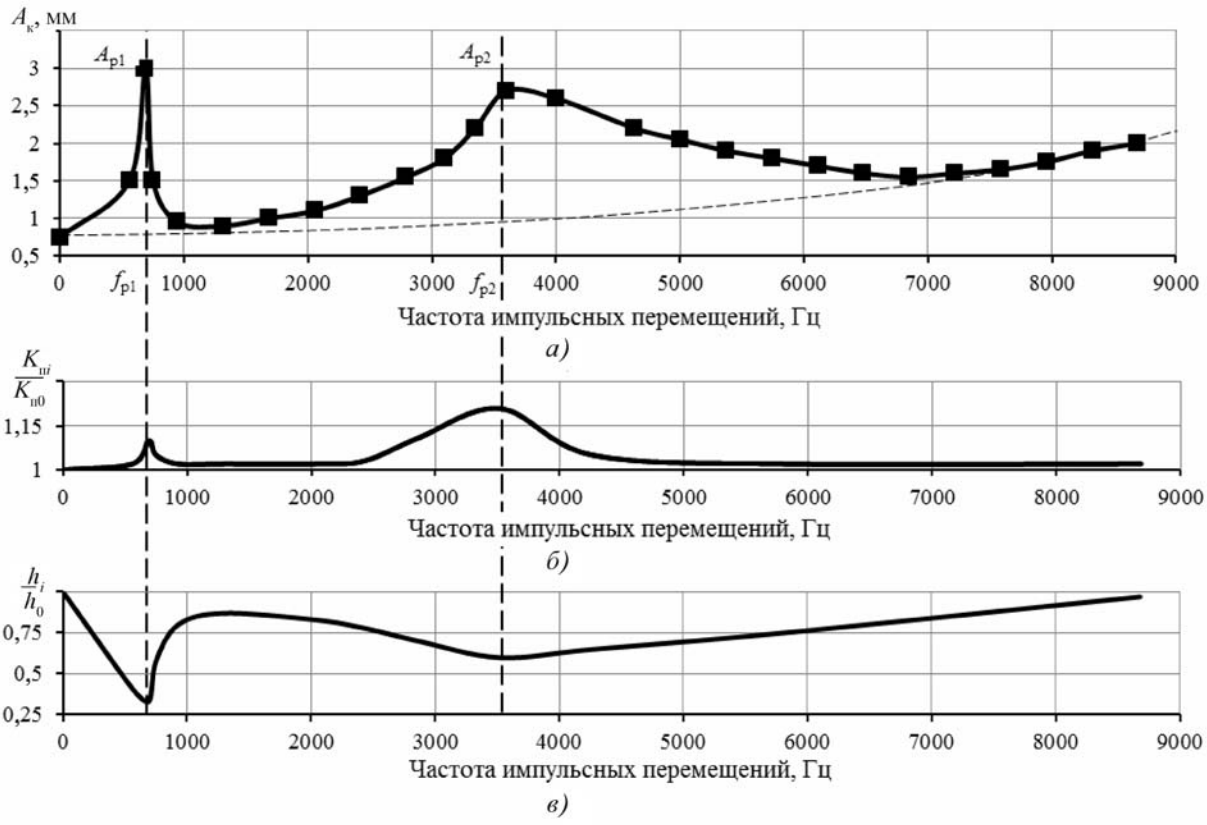
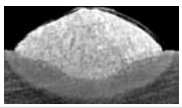
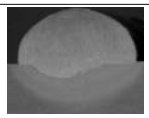
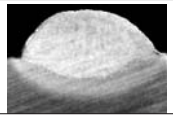
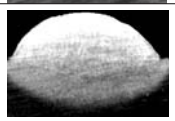
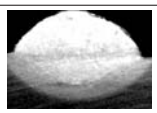


Рис. 3. Влияние частоты импульсных перемещений электрода на амплитуду колебаний торца электродной проволоки (*а*) и относительные показатели: производительности плавления ЭП (*б*) и глубины проплавления (*в*):
$f_{р1}, f_{р2}$ – резонансные частоты; $K_{п0}$, h_0 – показатели процесса при наплавке без импульсного воздействия; $K_{п\,i}$, h_i – то же при наплавке с импульсным воздействием ($d_э$ = 2 мм; I = 200 А; $v_{св}$ = 19 м/ч; $l_в$ = 48 мм)

Поперечное сечение валика и ДОМ при АНФ с высокочастотными импульсными перемещениями электрода

Частота f, Гц	Макрошлиф наплавленного валика	ДОМ
0		0,36
680 ($f_{р1}$)		0,13
1295		0,30
3820 ($f_{р2}$)		0,22
5800		0,25

ной частотой $f_р$ = 630 Гц, рассчитанной по уравнению (1).

Межрезонансный режим колебаний приводит к плавному изменению геометрии валика. При увеличении частоты возрастает силовое воздействие капель электродного металла на сварочную ванну, и в результате этого глубина проплавления и ДОМ увеличиваются.

Высокочастотные импульсные перемещения электрода оказывают влияние и на производительность наплавки. Увеличение частоты и амплитуды способствует уменьшению толщины жидкометаллической прослойки на торце электродной проволоки, возрастанию теплопередачи от дуги к электроду и повышению коэффициента расплавления электрода. Уже при частоте первого обертона $f_{р2}$ = 3820 Гц коэффициент расплавления ЭП превышает исходное значение более чем на 20 % (см. рис. 3, *а*).

Выводы

1. Приложение высокочастотного механического импульсного воздействия на электродную проволоку позволяет управлять размерами наплавленного валика

и производительностью процесса при автоматической наплавке под флюсом.

2. При поперечных импульсных перемещениях электродной проволоки в режиме резонанса допустимая амплитуда колебаний ее торца возрастает пропорционально диаметру электрода и пределу текучести электродного материала.

3. Наибольшее влияние поперечные механические колебания электродной проволоки оказывают в области резонансных частот: первого тона – на геометрические параметры наплавленного валика; второго тона – на производительность расплавления электрода.

4. При автоматической наплавке под флюсом конструкционных сталей механическое импульсное воздействие на электродную проволоку в диапазоне частот f = 600...4000 Гц позволяет снизить глубину проплавления и долю участия основного металла в наплавке в 3 раза, увеличить коэффициент расплавления электрода на 10...20 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Найденов А.М.** Расчет скорости плавления электродной проволоки при механизированных способах дуговой сварки // Сварочное производство. 1998. № 6. С. 10–14.

2. **Лебедев В.А.** Аспекты выбора оборудования для электродуговой и автоматической сварки с импульсной подачей электродной проволоки // Сварочное производство. 2008. № 5. С. 45–49.

3. **Размышляев А.Д., Миронова М.В.** Производительность плавления электродной проволоки при дуговой наплавке под флюсом с воздействием поперечного магнитного поля // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. 2011. № 1. С. 142–147.

4. **Управление** процессом механизированной сварки в углекислом газе с использованием параметров переноса электродного металла / В.А. Лебедев, И.С. Кузьмин, В.Г. Новгородский, В.Г. Пичак // Сварочное производство. 2002. № 5. С. 6–14.

5. **Драган С.В., Симутенков И.В.** Разработка устройства для управления геометрическими параметрами шва при автоматической наплавке под флюсом // Зб. наук. пр. НУК. 2011. № 3. С. 59–64.

Владимир Александрович Лебедев, д-р техн. наук,
lebedevvladimir@ukr.net;
Станислав Владимирович Драган, канд. техн. наук;
Жорж Гаврилович Голобородько, канд. техн. наук;
Иван Викторович Симутенков

ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

учебное пособие **Н.П. Алешин**

2013 г. Объем 576 с. Формат 60x88 1/16 Переплет ISBN 978-5-94275-695-6 Цена 1000 р.

Рассмотрены дефекты сварных соединений и физические методы неразрушающего контроля, основанные на использовании различных излучений и их взаимодействий с объектами контроля. Приведены классификации и рекомендации по выбору методов неразрушающего контроля. Изложены сведения по теории, оборудованию и технологиям методов дефектоскопии различных типов сварных соединений.

Для студентов, бакалавров, магистров, подготовка которых осуществляется в области сварочного производства, а также специалистов, проходящих сертификацию по EN 437.

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:

по почте: 107076, г. Москва, Стромынский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительная информация по телефонам: (499) 269-52-98, 269-66-00 и на сайте WWW.MASHIN.RU

УДК 621.983.539.374

И.Е. Семёнов, А.А. Горбулинский *(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)*

Расширение технологических возможностей эластичного рабочего инструмента

Рассмотрены два способа повышения жесткости эластичной рабочей среды. Первый способ – увеличение параметров жесткости рабочего инструмента при его предварительном сжатии и второй – армирование синтетическим высокопрочным материалом (СВМ) – арамидными тканями. Исследован вопрос об увеличении нормальных напряжений на поверхности контакта рабочего инструмента из полиуретана вследствие его армирования СВМ типа кевлара. Проведены математическое моделирование деформирования полиуретанового образца и сравнение напряжений и сил с экспериментальными данными.

Ключевые слова: эластомер; полиуретан; локальная формовка; армирование; математическое моделирование; напряженное состояние.

Two methods of stiffening elastic working environment: increasing the stiffness parameters of the working tool by its pre-compression and reinforcement with highstrength synthetic material – aramid fibers are considered. The question of increasing the normal stress on the contact surface of the working polyurethane tool due to its reinforcement with the kevlar is studied. Mathematical modeling of the deformation of the polyurethane sample and comparing the stresses and forces with the experimental data are performed.

Keywords: elastomer; polyurethane; local forming; reinforcement; mathematical modeling; stress state.

Введение. При обработке листовых металлов давлением достаточно давно применяют формовку эластичными средами. К основным преимуществам данного метода относятся значительное снижение затрат на рабочую оснастку и увеличение гибкости технологического процесса, что имеет особое значение для мелкосерийного и единичного производств.

В качестве эластичной среды для инструмента используют полиуретановые эластомеры. Большой интерес представляют процессы изготовления тонколистовых заготовок, имеющих выпукло-вогнутую рельефную поверхность на устройствах для локальной формовки [1].

Формирование рельефа на поверхности заготовок при этом осуществляется при пропускании последних между рельефной поверхностью матрицы, установленной на столе с приводом горизонтального перемещения, и вращающимся валом с эластичной оболочкой из полиуретана.

Оборудование с эластичным инструментом. В качестве примера рассмотрим конструкцию стана для производства покрытий для крыш, в принцип работы которого заложен метод локальной формовки, совмещенной с гибкой с применением эластичного рабочего инструмента [1]. Схема стана представлена на рис. 1.

На станине *1* установлен привод горизонтального перемещения стола *17*, который состоит из электродвигателя *3*, редуктора *2*, ходового винта *4* и роликов *7*. Гайка *5* жестко связана со столом *17*. На столе расположена матрица *8*, на которой находится листовая заготовка *10*, два прижима *9* и рейка *6*, копирующая профиль матрицы. Также на станине жестко закреплена траверса *11* с узлом вертикального перемещения деформирующего вала *14* с устройством предвари-

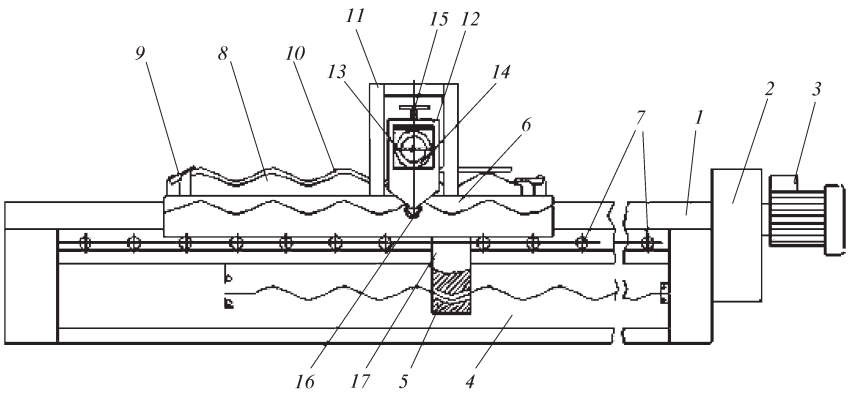


Рис. 1. Конструкция гибочно-формовочного листового стана

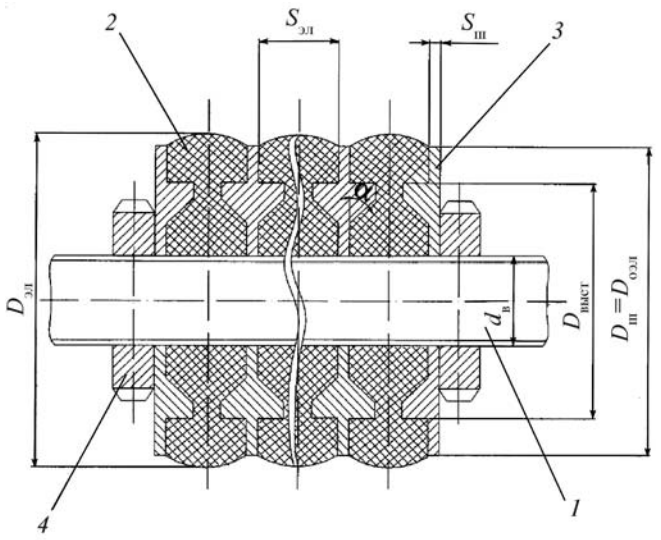


Рис. 2. Эластичный инструмент с регулируемой жесткостью

тельного поджима *12* с винтовым приводом *15* и с эластичной оболочкой *13*.

Стан работает следующим образом: в исходном состоянии стол *17* находится в крайнем правом положении, от электропривода *3* стол приводится в движение через передачу винт *4* – гайка *5* и движется по роликам *7*. При этом копирующий ролик *16* отслеживает профиль рейки *6* и задает вертикальное перемещение вала *14* с эластичной оболочкой.

Процесс заканчивается, когда стол достигает крайнего левого положения. В этом положении прижим *9* откидывается и готовая деталь снимается с матрицы. Затем новая заготовка устанавливается на матрицу, фиксируется правым зажимом и стол начинает движение в обратном направлении.

Способы повышения жесткости инструмента. При обработке тонколистовых заготовок эластичный рабочий инструмент применяют не только в операциях формообразования, но также в разделительных операциях.

Недостатком процесса является то, что при использовании эластичной среды давление на поверхности контакта эластичного инструмента с обрабатываемым материалом даже для полиуретана самых твердых марок типа СКУ-ПФЛ недостаточно для деформирования листовых сталей толщиной более 0,5 мм.

Для увеличения давления необходимо повышать жесткость эластичного рабочего инструмента (т.е. увеличить контактные нормальные напряжения, отвечающие за процессы пластической деформации при обработке листовых материалов) [2].

Добиться повышения жесткости эластичного инструмента можно двумя способами:

1) использованием эластичного инструмента с регулируемой жесткостью;

2) использованием армированного эластичного инструмента.

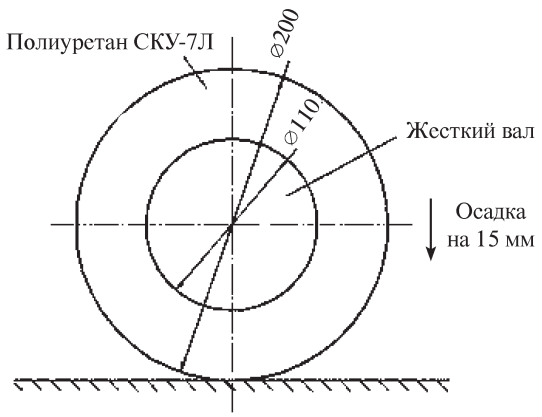


Рис. 3. Схема деформирования

Рассмотрим первый способ – использование эластичного инструмента с регулируемой жесткостью. Для повышения жесткости такой инструмент предусматривает создание в нем предварительных сжимающих напряжений в результате предварительного сжатия его в осевом направлении рис. 2 [3].

Эластичный инструмент работает следующим образом. Сначала проводят предварительную настройку на требуемую жесткость (которая зависит от механических характеристик и толщин обрабатываемого металла) эластичных элементов *2*, размещенных на жестком вале *1*, путем затяжки шайб *3* гайками *4* с условием, что степень деформации ε эластичных элементов 5 % < ε < 25 %, так как при ε > 20 % стойкость полиуретановой оболочки резко уменьшается. Затем инструмент закрепляют на стане и осуществляют деформирование заготовки.

Для изучения поведения предварительно нагруженного сжимающими напряжениями эластичного элемента была исследована оболочка в виде кольца шириной 100 мм из полиуретана СКУ-7Л (схема деформирования представлена на рис. 3).

В таблице приведены сравнительные механические характеристики наиболее широко применяемых марок полиуретана.

Деформирование кольца по толщине проводили путем его осадки (перемещением жесткого вала) при различных степенях предварительной деформации

Характеристики отечественных марок полиуретанов

Параметр	СКУ-6Л	СКУ-7Л	СКУ-ПФЛ
Сопротивление раздиру, МПа	50	До 60	50
Относительное удлинение, %	600	550	450
Остаточная деформация, %	3	6	12
Твердость на приборе ТМ-2, ед. Шора А	65	85	95

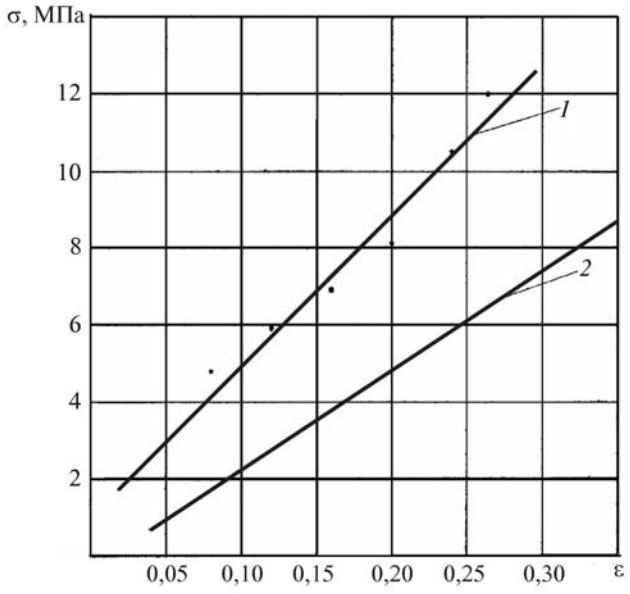


Рис. 4. Зависимости напряжение σ–деформация ε:
1 – предварительно нагруженный инструмент; *2* – ненагруженный инструмент

(по ширине) в условиях, близких к тем, которые будут реализованы в конкретном технологическом процессе – локальной формовке на стане.

Также проведены экспериментальные исследования процесса деформирования данного инструмента на плоскость и получены экспериментальные зависимости напряжение–деформация, представленные на рис. 4 (прямая *1*).

Значения средних нормальных напряжений на поверхности контакта получены по методу отпечатков (по изменению цветовой насыщенности отпечатков копировальной бумаги на поверхности контакта) [3].

Предельная степень деформации (отношение разницы между начальной и конечной толщиной кольца к начальной толщине) по толщине эластичного кольца составила 0,35.

Для сравнения на рис. 4 (прямая *2*) приведены зависимости напряжение–деформация для предварительно ненагруженного по толщине эластичного кольца. Из рис. 4 видно, что при предельно допустимой рабочей степени деформации эластичной оболочки 0,25 для полиуретана марки СКУ-7Л средние контактные нормальные напряжения для предварительно деформированного по толщине, с преобладающими сжимающими напряжениями эластичного кольца равны 11 МПа, а для предварительно ненагруженного эластичного кольца – 6 МПа, что почти в 2 раза меньше, чем для предварительно деформированного эластичного элемента.

Рассмотрим второй способ повышения жесткости – армированный эластичный инструмент. Инструмент армировали *синтетическим высокопрочным материалом* (СВМ) – арамидными тканями (ТУ 17 ВНИИПХВ-350–88). Сначала заливали полиуретан на половину толщины (пластина размерами 100×100×10 мм), затем укладывали СВМ и затем заливали остальную часть СКУ-7.

Результаты экспериментальных исследований. Для того чтобы оценить влияние армирования на работу эластичного инструмента на первом этапе надо провести моделирование процесса деформирования и для этого необходимо определить коэффициенты энергетической модели. Так как в последующих теоретических расчетах при деформировании гиперупругих материалов была принята энергетическая модель Муни-Ривлина, то использовали выражение для определения упругого потенциала через инварианты тензора деформации в предположении двухпараметрической модели, предложенное в работе [5].

Для расчетов по данной модели требуется определение двух коэффициентов Муни-Ривлина, для этого на этапе экспериментальных исследований цилиндрические образцы (диаметром 50 мм и высотой 10 мм) нагружали по схеме одноосного сжатия (осадка). Осаживали образцы из армированного и неармированного полиуретана марки СКУ-7Л.

Испытания образцов проводили на испытательной машине INSTRON мод. 600DX-F1-G1. Из графика, приведенного на рис. 5, были найдены численные значения степеней деформации, которые определяли из условия постоянства объема в соответствующих точках и напряжения в них как отношения сил к площади поверхности контакта рабочего инструмента с образцом.

Затем по методике, предложенной в работах [3, 5], были определены коэффициенты Муни-Ривлина, которые для армированного полиуретана составили: C_{10} = 2,895 МПа; C_{01} = 10,658 МПа.

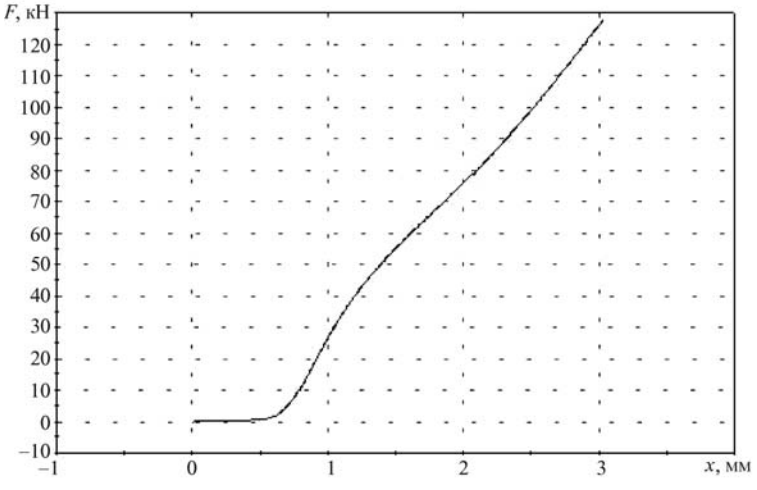


Рис. 5. Зависимость сил *F* от величины осадки *x* цилиндрического образца

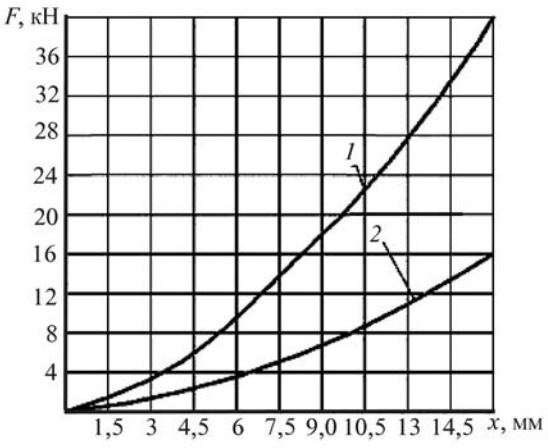


Рис. 7. Зависимости сила осадки *F*–величина осадки *x*:
1 – армированный полиуретан; *2* – изотропный полиуретан

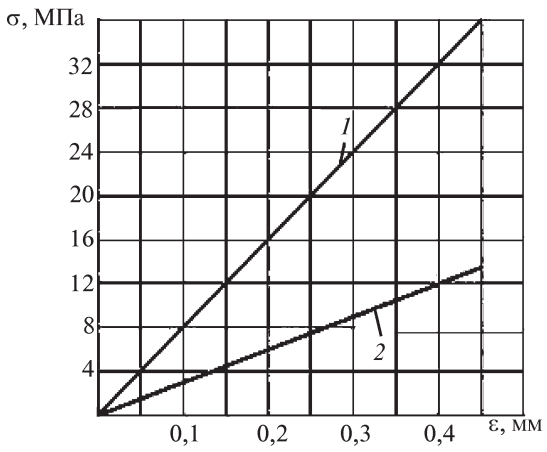


Рис. 8. Зависимости эквивалентные напряжения σ–эквивалентные деформации ε:
1 – армированный полиуретан; *2* – изотропный полиуретан

Моделирование деформирования эластичного инструмента. В качестве задачи, позволяющей оценить численное увеличение жесткости рабочего инструмента, как следствие его армирования СВМ, была выбрана задача осадки рабочего инструмента на плоскость (см. рис. 3).

Целью решения данной задачи является численная оценка увеличения напряжений на поверхности контакта, возникающих в армированном рабочем инструменте, по сравнению с инструментом, выполненным из изотропного полиуретана. Учитывая сложности точного моделирования параарамидного волокна, приближенно можно считать армированный эластомер изотропным однородным материалом.

Схема нагружения соответствовала схеме, представленной на рис. 3, только оболочка из полиуретана СКУ-7Л принята армированной. Была разработана математическая конечно-элементная модель задачи с использованием специализированного программного комплекса "ANSYS" [3–5].

При моделировании приняты следующие характеристики материалов [6, 7]: рабочий инструмент – кольцо (внешний диаметр 200 мм, внутренний диаметр 110 мм) из полиуретана СКУ–7Л: плотность 3000 кг/м^3, коэффициент Пуассона 0,49, определенные ранее константы двухпараметрической модели Муни-Ривлина для СКУ-7Л: C_{01} = 1,45; C_{10} = 0,62 и для армированного полиуретана: C_{01} = 10,658; C_{10} = 2,895. Жесткий вал внешним диаметром 110 мм принят абсолютно жестким телом.

Результаты расчета для изотропного и армированного полиуретана приведены на рис. 6 (см. обложку).

На рис. 6, *а* показано поле нормальных напряжений (при максимальной степени деформации) по вертикальной оси *Y*. Максимум сжимающих напряжений достигается в центральной части пятна контакта эластичной оболочки с жестким валом и составляет 6 МПа. Далее, по мере удаления значения сжимающих напряжений уменьшаются сначала до 4 МПа, затем до 2 МПа и на границе пятна контакта полиуретана с жесткой плоскостью – до 1 МПа.

На рис. 6, *б* представлено поле нормальных напряжений (при максимальной степени деформации) по вертикальной оси *Y*, полученное для армированной полиуретановой оболочки. Максимум сжимающих напряжений достигается в центральной части пятна контакта эластичной оболочки с жестким валом и составляет 37,5 МПа. По мере удаления значения сжимающих напряжений уменьшаются сначала до 28 МПа, затем до 15 МПа и на границе пятна контакта полиуретана с жесткой плоскостью – до 5 МПа.

По результатам моделирования осадки изотропной и армированной эластичной оболочки на плоскость были получены зависимости сил от величины осадки эластичной оболочки и зависимости эквивалентных напряжений по Мизесу от эквивалентных деформаций, графики которых приведены на рис. 7 и 8 соответственно.

Из рис. 7 и 8 видно, что армирование приводит к существенному увеличению сил и напряжений. Так при максимально допустимой степени деформации эластичного инструмента 0,3 эквивалентные напряжения возрастают в 3 раза, а на поверхности контакта нормальные напряжения при максимальной степени деформации 0,3 по вертикальной оси *Y* увеличиваются в центре пятна контакта более чем в 5 раз (см. рис. 6, *б*) относительно модели из изотропного полиуретана.

Заключение. Применение эластичного инструмента с регулируемой предварительной сжатой схемой позволяет увеличивать нормальные напряжения на поверхности контакта в результате предварительной деформации до 2 раз.

Использование армированного рабочего инструмента еще в большей степени (до 5 раз) увеличивает нормальные напряжения на поверхности контакта, что позволит увеличить максимальные толщины обрабатываемого металла, или обрабатывать более прочные материалы (материалы с большими значениями предела прочности), т.е. существенно расширить номенклатуру обрабатываемых материалов эластичными средами.

Использование этих способов позволит существенно расширить технологические возможности обработки металлов давлением с применением эластичного рабочего инструмента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Пат. 2197354 РФ, МКП B 21 D 22/10.** Стан локальной формовки-гибки для изготовления изделий с рельефной поверхностью из листового металла / И.Е. Семёнов. Опубл. 27.01.03. Бюл. № 3.

2. **Пат. 2246370 РФ, МКП B 21 D 22/10, 5/14. 2005.** Эластичный инструмент с регулируемой жесткостью для локальной формовки листового металла / И.Е. Семёнов. Опубл. 20.02.05. Бюл. № 5.

3. **Семёнов И.Е., Рыженко С.Н., Крутова М.В.** Моделирование процесса деформирования полосы эластичным и жестким рабочим инструментом // Сталь. 2007. № 5. С. 83–87.

4. **Семёнов И.Е., Рыженко С.Н., Поворов С.В.** Динамическое моделирование процесса локальной гибки-формовки для технологий производства покрытий для крыш // Заготовительные производства в машиностроении. 2007. № 10. С. 40–43.

5. **Семёнов И.Е., Рыженко С.Н., Поворов С.В.** Исследование напряженно-деформированного состояния эластичного рабочего инструмента и тонколистовой заготовки в процессе локальной гибки-формовки // Сб. тр. седьмой конф. пользователей программного обеспечения CAD-FEM GmbH. М.: Полигон-пресс, 2007. С. 350–354.

6. **Семёнов И.Е., Рыженко С.Н., Поворов С.В.** Моделирование процесса формовки на профилегибочном стане с эластичным рабочим инструментом // Вестник МГТУ. 2010. № 4 (79). С. 86–93.

7. **Евсюков С.А., Петрушина М.М.** Изготовление кольцевых деталей с U-образной образующей // Состояние, проблемы и перспективы развития кузнечно-прессового машиностроения кузнечно-штамповочных производств: сб. докл. и материалов X конгресса "Кузнец–2010". Рязань, 2010. С. 215–222.

8. **Семёнов И.Е., Рыженко С.Н., Поворов С.В.** Моделирование процессов последовательной формовки продольных каналов в листе на стане с эластичным и жестким инструментом // Заготовительные производства в машиностроении. 2010. № 6. С. 29–32.

Иван Евгеньевич Семёнов, д-р техн. наук,
sieprof@mail.ru;
Антон Аркадьевич Горбулинский

УДК 621.735.32

Д.В. Хван, А.Д. Хван, А.Т. Крук *(Воронежский государственный технический университет)*

Восстановление изношенных цилиндрических деталей пластической осадкой

Разработан способ восстановления изношенных цилиндрических деталей пластической осадкой. Представлены опытные данные, подтверждающие высокую эффективность предложенного способа.

Ключевые слова: направляющие стойки; пластическая осадка; матрица; штамп; деформация; сила сжатия.

Method of restoring the worn cylindrical parts by plastic upsetting is developed. Experimental data confirming the high efficiency of the proposed method are presented.

Keywords: rack rails; plastic upsetting; matrix; stamp; strain; compression force.

Во многих машинах, механизмах, а также в технологическом оборудовании применяют детали цилиндрической формы, которые изнашиваются по внешней поверхности при сопряжении с другими конструктивными элементами. Из-за износа происходит уменьшение диаметра детали, что делает их непригодными для дальнейшей эксплуатации.

На рис. 1 показаны детали ступенчатой формы, для которых разработан предлагаемый способ восстановления. Такие детали часто используются в прессовом оборудовании и технологической оснастке (например, направляющие колонки), которые обеспечивают возвратно-поступательное движение подвижных частей и при этом интенсивно изнашиваются, а это является причиной снижения точности работы оборудования.

Еще одним примером деталей цилиндрической формы, которые подвергаются интенсивному износу, являются направляющие штыри, которые применяют

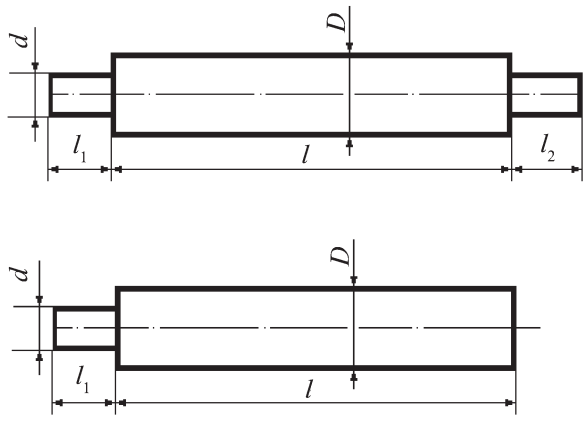


Рис. 1. Заготовки ступенчатой формы

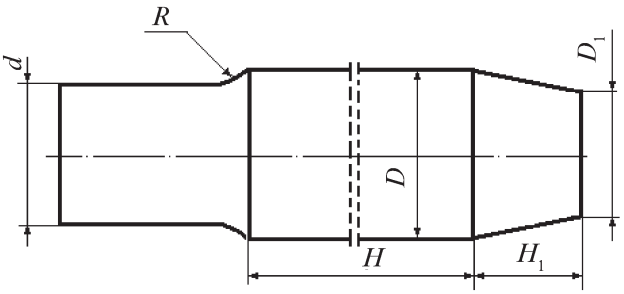


Рис. 2. Типовая форма направляющих штырей

в литейном производстве при сборке литейных форм. На рис. 2 приведена наиболее распространенная форма штыря.

Представленные штыри имеют три основные части: коническую с углом конусности α, направляющую и центрирующую длиной H и диаметром D, а также крепежную диаметром $d < D$. В зависимости от соотношения длины рабочей части H и диаметра детали D различают длинномерные ($H > 3D$) и короткие ($H < 3D$) штыри. Основной причиной изнашивания рабочей части штыря является многократная сборка и разборка литейных форм, и износ приводит к неточности монтажа литейных форм.

Рассмотренные элементы конструкций, как правило, изготовляют из высококачественных и дорогостоящих марок сталей, поэтому целесообразно не утилизировать изношенные детали, а подвергать их реставрации. При этом достигается значительное сбережение материала, экономия энергоресурсов и временных затрат.

Как один из способов ремонта, непригодных для использования деталей (см. кн.: Молодык Н.В., Зенин А.С. Восстановление деталей машин. М.: Машиностроение, 1989. 234 с.) предлагается технология восстановления цилиндрических элементов конструкций на основе пластической осадки. Для осуществления указанного процесса применительно к деталям ступенчатой формы необходимо разработать специальный штамп, позволяющий реализовывать пластическое сжатие только изношенного участка рабочей части с диаметром D (см. рис. 1 и 2).

В статье рассмотрена конструкция штампа для ремонта рассмотренных выше деталей. В соответствии со схемой нагружения, представленной на рис. 3, происходит деформирование концевых частей торцов колонки.

В связи с этим требуется другая схема нагружения с использованием матрицы. На рис. 4 приведено нагружение ступенчатой детали *1* через матрицу *2*, имеющую внутреннее соосное отверстие диаметром *d*. Такая схема нагружения позволяет добиться необходимой кинематики деформирования с исключением пластического формоизменения концевых частей торцов колонки.

Однако и в такой схеме нагружения детали есть существенный недостаток, который связан с образованием в приконтактной зоне местных наплывов восстанавливаемой части детали.

Для решения поставленной технической задачи предложена форма матрицы (рис. 5, *а*), которая имеет цилиндрическое гнездо, соосное отверстию диаметра *d*.

На торцевой поверхности матрицы выполняется соосное отверстию диаметра *d* цилиндрическое гнездо

Рис. 3. Схема нагружения ступенчатой детали

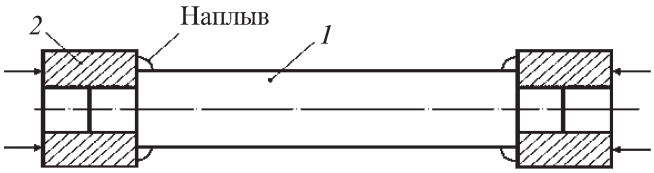


Рис. 4. Нагружение ступенчатой детали через матрицу

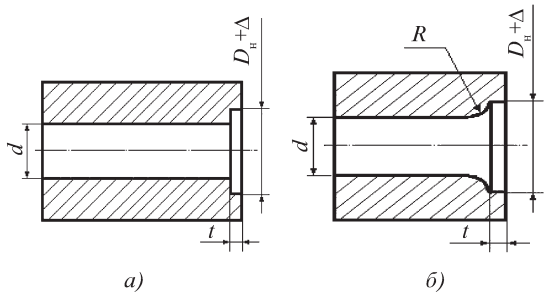


Рис. 5. Предлагаемые формы матриц

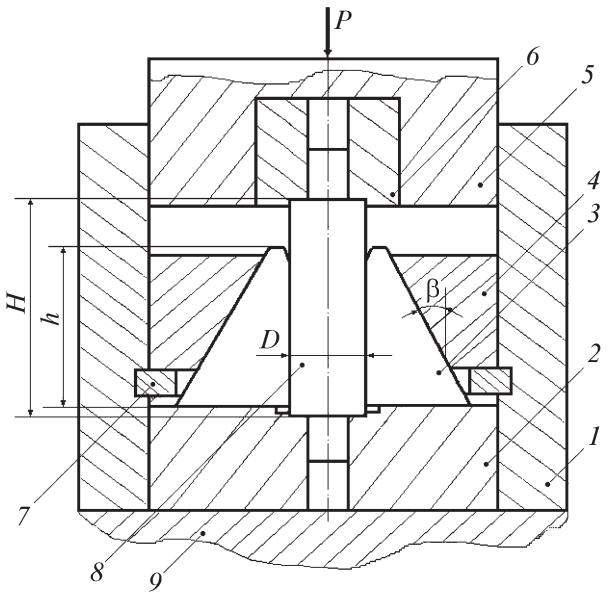


Рис. 6. Штамп для восстановления ступенчатых деталей

глубиной $t = 2...3$ мм и диаметром $D = D_н + \Delta$, где Δ – припуск на механическую обработку для получения номинального посадочного диаметра $D_н$. Для деталей, имеющих галтель с радиусом R, предложено использовать матрицу, в которой для сопряжения выполняется галтель с таким же радиусом (рис. 5, *б*).

На рис. 6 приведена конструкция штампа, которая является достаточно простой в эксплуатации и конструктивном отношении. В качестве основы разработанной конструкции можно применять штампы, рассмотренные, например, в [1], но для промышленных условий при выполнении ремонтных работ, относящихся обычно к мелкосерийному производству, целесообразно использовать предложенный в статье штамп.

Штамп (см. рис. 6) состоит из следующих основных элементов: корпус из стали в форме цилиндра *1*; нижняя матрица *2*, которая вставлена по поверхности посадки в корпус; поддерживающие секторы *3* длиной L и с углом конусности 2β; обойма *4* с таким же углом конусности; пуансон *5*; запрессованная в него верхняя матрица *6*; стопорное кольцо *7*, которое разрезано на две равные части; обрабатываемая деталь *8*; стол пресса *9*.

Для предотвращения продольного изгиба выступающей из секторов концевой части образца должно выполняться условие

$$H = L + 2D, \qquad (1)$$

где L – высота секторов.

В работе Д.В. Хвана (см. кн.: Повышение эффективности в обработке материалов давлением. Воронеж: Изд-во Воронежского гос. ун-та, 1995. 224 с.) подробно описаны алгоритм расчета угла конусности

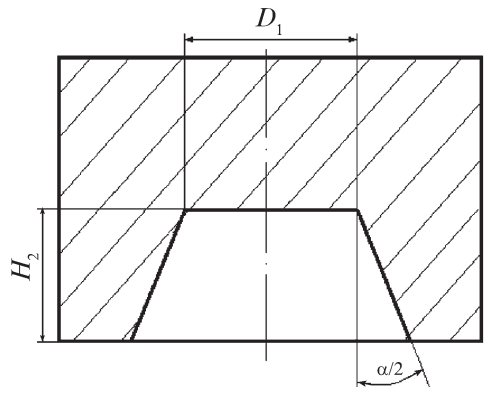


Рис. 7. Верхняя матрица для восстановления штырей

2β и механическое взаимодействие подвижных частей штампа и детали *8* (см. рис. 6).

Процесс пластической осадки для восстановления детали в рассмотренном штампе реализуют в следующей последовательности. Восстанавливаемую деталь для уменьшения деформирующей силы подвергают рекристаллизационному отжигу. Затем зачищают и устанавливают между поддерживающими секторами *3*, а нижнюю часть детали вводят в гнездо матрицы *2*. После этого пуансоном *5* закрывают корпус *1*.

Далее в соответствии с рис. 6 нагружают деталь *8* через пуансон *5* с матрицей *6* силой *P* на прессе до необходимой степени деформации. После этого обработанную деталь извлекают из штампа и подвергают механотермической обработке для получения номинального диаметра $D_н$ и необходимой твердости на рабочей поверхности.

Для восстановления штырей (см. рис. 2) матрицу (рис. 7) устанавливают в пуансон *5* (см. рис. 6). Рекомендуемый размер $H_2 = H_1 + (2...3)$ мм. В соответствии с рис. 5 посадочное гнездо в матрице *2* должно иметь галтель радиуса *R*.

Для экспериментального обоснования возможности пластической осадки длинномерных ступенчатых цилиндрических деталей были обработаны образцы из термически необработанной стали 45. Эскиз образца показан на рис. 8. Для проведения испытаний использовали матрицы первого типа (см. рис. 5, *а*).

На рис. 9 приведена фотография образцов: первый (слева направо) – недеформированный образец; второй – осаженный до относительной деформации ~5 %

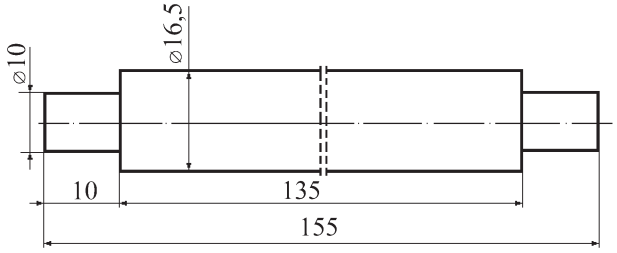


Рис. 8. Эскиз образца

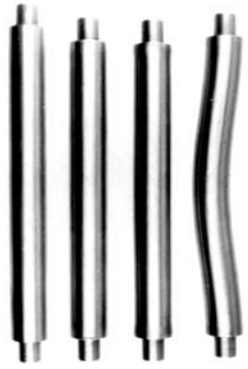


Рис. 9. Фотография образцов

с применением матрицы, в которых выполнено гнездо; третий – сжатый до деформации $\varepsilon = 5$ %, но с применением матриц с плоскими торцами; четвертый – сжатый с матрицами, но без поддерживающих секторов.

Из рис. 9 видно, что второй и третий образцы осажены без искривления. На третьем образце в приконтактной зоне образовались наплывы. Осадка детали в штампе без использования поддерживающих элементов приводит к изгибу. Таким образом, только на втором образце достигнута достаточно высокая точность (с отклонением ~ 3 %) увеличения диаметра осаживаемой части образца.

Для компенсирования износа и припуска на механическую обработку достаточно осаживать реставрируемую деталь на ~3 %. Поэтому существует возможность восстанавливать подверженные износу детали до 4 раз при условии отсутствия влияния изменения длины рабочей части на возможность эксплуатации элемента.

В целях внедрения в производство новой технологии ремонта изношенных деталей был успешно реализован заказ ОАО "Курскагромаш" на разработку штампа для восстановления посадочного диаметра 34,85 – 0,05 круглого штыря для модельных плит. Эскиз этой детали представлен на рис. 10.

При реализации новой технологии восстановления изношенных штырей из стали 20Х их подвергали предварительной термообработке.

Указанные штыри имеют $\alpha_0 = (H / D) < 2$, поэтому их осадку осуществляли в рассмотренном штампе без поддерживающих секторов. При этом для матриц *2* и *6* (см. рис. 5 и 7) были приняты следующие технологические размеры: $d = 26{,}05$ мм; $R = 5$ мм; $D' = 35{,}1$ мм; $t = 2$ мм; $D_2 = 20$ мм; $H_2 = 19{,}5$ мм; $\alpha = 47°$.

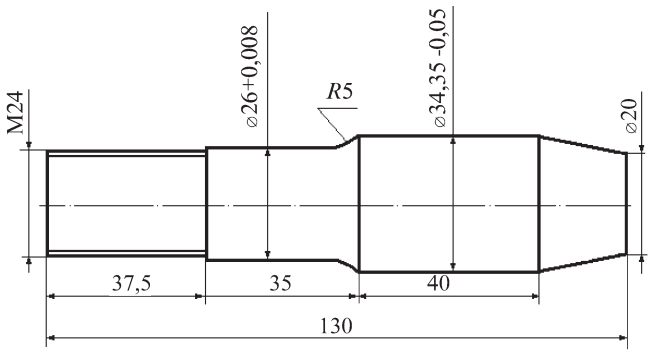


Рис. 10. Эскиз штыря для модельных плит

Рис. 11. Фотография штампа для восстановления штырей

Рис. 12. Фотография штырей

На рис. 11 и 12 показаны соответственно фотографии разработанного штампа и испытанных штырей.

Нижний образец (рис. 12) был осажен в матрице без посадочного гнезда. В нижней части этого штыря образовался наплыв с наибольшим диаметром ~36 мм. Результаты замера пригодных к применению деформированных штырей показали, что диаметр по всей рабочей части последних составил (35,2 ± ± 0,1) мм.

Таким образом, была экспериментально обоснована возможность пластического формоизменения на основе осадки ступенчатых цилиндрических деталей с применением штампа с поддерживающими секторами, а также целесообразность использования разработанной новой технологии ремонта изношенных элементов конструкций в производстве.

Вывод

Разработана инновационная технология реновации цилиндрической формы деталей пластической осадкой на основе применения специального штампа. Она может быть использована с высокой эффективностью на производстве.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Хван Д.В., Пешков Е.В.** Применение процессов осадки в восстановлении длинномерных деталей // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2002. № 9. С. 23–25.

Дмитрий Владимирович Хван, д-р техн. наук;
Александр Дмитриевич Хван, канд. техн. наук;
Александр Тимофеевич Крук, д-р техн. наук,
kruk938@mail.ru

УДК 621.771

В.Б. Мамаев, М.В. Мамаев *(Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьёва)*

Математическое моделирование напряженного состояния при пластической деформации элементарного объема тела на примере осадки

Часть 3. Инвариантность напряженного состояния*

Выполнен анализ напряженного состояния в элементарном объеме (конечном элементе или точке). Показано, что среднее главное нормальное напряжение не оказывает непосредственного влияния на требуемое напряжение текучести, а условие пластичности Треска–Сен-Венана является точным и достаточным. Приведены формулы, выражающие условие пластичности в зависимости от используемой для решения конкретной задачи системы координат и формы представления.

Ключевые слова: упругопластическое деформирование; математическое моделирование; напряженное состояние; элементарный объем; конечный элемент; условия пластичности.

Stressed state in elementary volume (such as finite element or point) is analysed. Proved that average principal normal stress does not affect required yielding flow stress, and Tresca–Saint-Venant's ductility conditions is precise and sufficient. Ductility conditions also shown in various formulation, depending on used solution for various representation forms and chosen coordinate system.

Keywords: plastoelastic deformation; mathematical simulation; stressed state; elementary volume; finite element; ductility conditions.

Такие понятия, как главные направления и, соответственно, напряжения и деформации, необходимы с одной стороны для описания, анализа и использования важного экспериментально установленного положения. Оно заключается в том, что в каждый данный момент активной пластической деформации в условиях простого нагружения направления главных линейных деформаций совпадают с направлениями главных нормальных напряжений, т.е. представление напряженного состояния точки в главных напряжениях необходимо для установления связи между напряжениями и деформациями, а также для дальнейшего анализа деформированного состояния и формоизменения элементарного объема в результате пластической деформации. С другой стороны, анализ главных нормальных напряжений позволяет получать условия пластичности в виде наиболее простых с точки зрения записи формул и их последующего анализа.

Располагая выражением $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s = \sigma_{s\,13}$ (40) условия пластичности, возникает вопрос его использования, но уже в других системах координат, т.е. не в координатах, представляющих главные направления 1, 2, 3 и не в местных координатах, принятых для рассмотрения элементарного объема, а в других координатах, очевидно, выбранных для описания формы и размеров всего деформируемого тела. Поэтому, несмотря на то, что запись выражений будет усложняться, возникает практическая необходимость преобразования условия (40) и его представления в других системах координат, указанных выше.

В то же время свойство инвариантности напряженного и деформированного состояния используется в основном только для того, чтобы убедиться, что два разных по записи тензора описывают одинаковое состояние и описывают ли они напряженное или деформированное состояние. Свойство инвариантности на базе использования современной вычислительной техники путем перехода от одной системы координат к другой, а также изменения размерности задачи и рассмотрения ее поэтапно легко позволяет решать многие проблемы. Таким образом, далее рассмотрена возможность использования условия пластичности (40) при разложении полного напряжения на составляющие и представлении его на различных последующих уровнях.

В общем случае полное напряжение может быть представлено девятью отличными от нуля компонентами тензора напряжений, где в зависимости от выбираемой системы координат до восьми компонент могут быть равны нулю, т.е. возникает многовариантность разложения линейной величины при представлении ее в тензорной форме.

На основании теоремы Виета, которая устанавливает зависимость между корнями кубического уравнения и его коэффициентами (с учетом кратности), может быть составлено характеристическое уравнение. Поэтому обратная задача, состоящая в том, чтобы показать, что два тензора напряжений отражают одинаковое или различное напряженное состояние, сводится

* Начало см. № 11, 2013 и № 2, 2014.

к определению и сравнению коэффициентов характеристического уравнения – инвариантов и при решении в численном виде не вызывает особых затруднений. Однако прямая задача в силу неоднозначности ее решений заслуживает особого внимания.

Развивая понятие инвариантности (независимости напряженного состояния от выбранной системы координат), с математической точки зрения также следует, что формально напряженное состояние в точке, но уже в зависимости от принятой системы координат, может быть представлено как линейное, плоское или объемное.

С другой стороны, также можно считать, что объект, обладающий таким свойством, как объем, всегда находится в объемном напряженном состоянии, даже если одна или две из трех компонент равны нулю. Равенство нулю не означает отсутствие напряжений, а только численно отражает его значение относительно условно принятой точки отсчета в используемой системе координат.

Таким образом, существующее фактически напряженное состояние нельзя изменить выбором системы координат или математическими преобразованиями. Тем не менее этим выбором или преобразованиями не следует пренебрегать, а, наоборот, использовать их при решении задач для упрощения и сокращения числа компонент, в том числе неизвестных, а также числа уравнений и снижения их сложности. При этом далеко не всегда следует придавать им какой-либо физический или другой смысл.

Приведенное выше может быть отнесено также и к искусственному разделению напряжений на нормальные и касательные, которое возникло в процессе зарождения и развития теории упругости и пластичности и соответствовало уровню знаний, как математических, так и в данной области.

Напряженное состояние в точке, находящейся в пластическом состоянии, инвариантно, т.е. не зависит от принятой системы координат. Оно будет отвечать уравнениям (1) и (2), а в общем случае с точки зрения геометрии являться поверхностью действительного эллипсоида.

Анализ, выполненный в работе [6] и двух предыдущих частях статьи, показал, что параметрами, характеризующими напряженное состояние, являются: полное напряжение – p_o, его величина, направление и ориентация в пространстве, а также σ_s – линейное напряжение текучести (сопротивление пластическому деформированию или давление течения) или $\gamma_{s\,13}$ – соответствующая σ_s величина угла между главным напряжением σ_1 и результирующим σ_1 и σ_3 напряжением σ_{13}.

Рассмотрим вопрос представления полного напряжения в трехмерном пространстве на трех различных уровнях:

$$p_o^3 = \begin{bmatrix} p_o & 0 & 0 \\ 0 & p_o & 0 \\ 0 & 0 & p_o \end{bmatrix} = \\ = T_{\sigma_{C1}} \begin{bmatrix} \sigma_3 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_1 \end{bmatrix} = T_{\sigma_{C2}} \begin{bmatrix} \sigma_{X0} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{Y0} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{Z0} \end{bmatrix} = \\ = T_{\sigma_{C3}} \begin{bmatrix} \sigma_{XX} & \sigma_{XY} & \sigma_{XZ} \\ \sigma_{YX} & \sigma_{YY} & \sigma_{YZ} \\ \sigma_{ZX} & \sigma_{ZY} & \sigma_{ZZ} \end{bmatrix} = T_{\sigma_{C3}} \begin{bmatrix} \sigma_X & \tau_{XY} & \tau_{XZ} \\ \tau_{YX} & \sigma_Y & \tau_{YZ} \\ \tau_{ZX} & \tau_{ZY} & \sigma_Z \end{bmatrix}, \quad (41)$$

где $T_{\sigma_{C1}}$, $T_{\sigma_{C2}}$, $T_{\sigma_{C3}}$ – функции, соответствующие величине и характеру преобразования, т.е. сжатия-свертки, или трансформации в соответствующую систему координат, форму или уровень представления полного напряжения p_o.

Если равенство (41) умножить на $4\pi/3$, то получим уравнение, связывающее объемы тел – шара радиусом p_o (нулевой уровень), эллипсоидов с полуосями σ_1, σ_2, σ_3 (первый уровень) или σ_{X0}, σ_{Y0}, σ_{Z0} (второй уровень), однако на третьем уровне представления таких эллипсоидов уже будет шесть: три положительных и три отрицательных.

В качестве первого уровня условно будем считать разложение полного напряжения на главные нормальные напряжения – σ_1, σ_2, σ_3:

$$p_o^3 = \begin{bmatrix} p_o & 0 & 0 \\ 0 & p_o & 0 \\ 0 & 0 & p_o \end{bmatrix} = \\ = \begin{bmatrix} \dfrac{\sigma_3}{\cos\gamma_{p3}} & 0 & 0 \\ 0 & \dfrac{\sigma_2}{\cos\gamma_{p2}} & 0 \\ 0 & 0 & \dfrac{\sigma_1}{\cos\gamma_{p1}} \end{bmatrix} = \\ = \frac{1}{\cos\gamma_{p1}\cos\gamma_{p2}\cos\gamma_{p3}} \begin{bmatrix} \sigma_3 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_1 \end{bmatrix} = \\ = T_{\sigma_{C1}} \begin{bmatrix} \sigma_3 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_1 \end{bmatrix}, \quad (42)$$

где γ_{p1}, γ_{p2}, γ_{p3} – углы между полным напряжением p_o и соответствующими главными направлениями, которые так же как и другие обозначения показаны на рис. 2–4,

$$T_{\sigma_{C1}} = \frac{1}{\cos\gamma_{p1}\cos\gamma_{p2}\cos\gamma_{p3}} = \\ = \frac{1}{\cos(\varphi_{Z1}-\varphi)\cos(\varphi_{Z2}-\varphi)\cos(\varphi_{Z3}-\varphi)}. \quad (43)$$

Вторым уровнем представления напряженного состояния условно будем считать разложение полного напряжения на нормальные напряжения σ_{X0}, σ_{Y0}, σ_{Z0}. На рис. 1–3 можно видеть, что компоненты полного напряжения p_o могут быть представлены с помощью углов γ и θ следующим образом:

$$\sigma_{X0} = p_o \sin\varphi \cos\theta = \sigma_3 \frac{\sin\varphi \cos\theta}{\cos\gamma_{p3}};$$

$$\sigma_{Y0} = p_o \sin\varphi \sin\theta = \sigma_2 \frac{\sin\varphi \sin\theta}{\cos\gamma_{p2}}; \qquad (44)$$

$$\sigma_{Z0} = p_o \cos\varphi = \sigma_1 \frac{\cos\varphi}{\cos\gamma_{p1}},$$

откуда следует

$$\theta = \operatorname{arctg}\left(\frac{\sigma_{Y0}}{\sigma_{X0}}\right), \qquad (45)$$

а также

$$p_o^3 = \begin{bmatrix} p_o & 0 & 0 \\ 0 & p_o & 0 \\ 0 & 0 & p_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{\sigma_{X0}}{\sin\varphi\cos\theta} & 0 & 0 \\ 0 & \dfrac{\sigma_{Y0}}{\sin\varphi\sin\theta} & 0 \\ 0 & 0 & \dfrac{\sigma_{Z0}}{\cos\varphi} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sin^2\varphi\cdot\cos\varphi\cdot\cos\theta} \begin{bmatrix} \sigma_{X0} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{Y0} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{Z0} \end{bmatrix} = T_{\sigma_{C2}} \begin{bmatrix} \sigma_{X0} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{Y0} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{Z0} \end{bmatrix}, \qquad (46)$$

где

$$T_{\sigma_{C2}} = \frac{1}{\sin^2\varphi\cdot\cos\varphi\cdot\sin\theta\cdot\cos\theta} = \frac{1}{4\sin\varphi\cdot\sin(2\cdot\varphi)\cdot\sin(2\cdot\theta)}. \qquad (47)$$

Продолжая анализ влияния угла φ на напряженное состояние в точке, а также обращаясь к вопросу об отнесении напряжений σ_{X0}, σ_{Y0} и σ_{Z0} к главным напряжениям, следует объяснить сущность последних.

Отнесение одной или обеих компонент – σ_{X0} и σ_{Y0} к касательным напряжениям, как предположение, возможно, но только как частный случай, когда они достаточно малы. Кроме того, мнения о максимально возможной величине касательных напряжений расходятся. По одним утверждениям касательные напряжения не должны превышать половины от нормального напряжения, так как максимальный коэффициент внешнего контактного (и внутреннего) трения $\mu_{A\max} = 0{,}5$. Или наоборот, коэффициент контактного трения $\mu_{A\max} > 0{,}5$ при наличии на контактной поверхности зоны скольжения невозможен, так как величина касательного напряжения не превышает половины от нормального напряжения. С другой стороны, использование такого понятия, как фактор трения ($\mu_{s\max} = 0{,}5$), предполагает, что касательные напряжения не могут превышать половины напряжения текучести σ_s.

Также имеются теоретические исследования, где доля максимальных касательных напряжений по отношению к нормальным напряжениям или даже коэффициент трения и фактор трения увеличиваются, например, при плоском деформированном состоянии с учетом коэффициента Лоде β до величины $1/\sqrt{3} = 0{,}577$.

Таким образом, искусственное разделение компонент полного напряжения p_o (или компонент тензора напряжений) на нормальные и касательные привело к тому, что представления о максимально возможной величине касательных напряжений разделяются. Возникает целый ряд вопросов. Какую часть полного напряжения следует относить к нормальной составляющей, а какую к касательной? Следует ли суммировать нормальные и касательные составляющие, действующие в одинаковом направлении и как? Или же это разделение целесообразно с точки зрения какого-то особого функционального свойства каждой составляющей и придает ей свой смысл, заключающийся в ее ответственности за какую-то выделяемую функцию?

Поэтому, основываясь на равноправности всех компонент напряженного состояния с математических позиций, при дальнейшем проведении исследований была предпринята попытка избегать употребления термина "касательное напряжение" как обособленного понятия.

По существующим определениям, в силу их несовершенства, полученные напряжения σ_{X0}, σ_{Y0} и σ_{Z0} тоже могут быть отнесены к главным напряжениям, так как являются главными полуосями эллипсоида полного напряжения p_o, но уже другого, т.е. условно – второго уровня и уже в других координатах. Для координат XYZ условие пластичности (40) с учетом (44) может быть записано в следующем общем виде:

$$\frac{\cos\gamma_{p1}}{\cos\varphi}\sigma_{Z0} - \frac{\cos\gamma_{p3}}{\sin\varphi\cos\theta}\sigma_{X0} = \sigma_{s13}. \qquad (48)$$

Для σ_{X0}, σ_{Y0} и σ_{Z0} характерно отсутствие касательных напряжений, выполнение условия пластичности (48), также могут быть установлены линейные

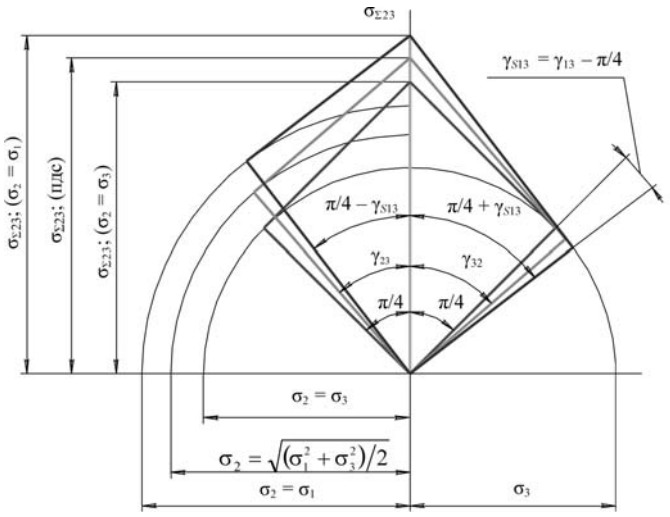


Рис. 8. Сечение эллипсоида напряжений в плоскости главных направлений 2, 3 и суммирующего напряжения σ_{23}:
γ_{23}, γ_{32} – углы между главными нормальными напряжениями σ_2, σ_3 и результирующим их напряжением $\sigma_{\Sigma 23}$

компоненты деформаций в соответствующих им направлениях.

Для анализа напряженного состояния использование главных напряжений второго уровня явилось даже более предпочтительным, например, с точки зрения выбора местной системы координат, позволяющей путем параллельного переноса представлять более наглядные получаемые результаты в системе координат, принятой для всего тела. Число компонент напряжений, отличных от нуля, снижается от девяти до трех, также сводится к минимуму число требуемых для получения решений исходных уравнений и условий.

В условии пластичности (48) число факторов также может быть сокращено за счет введения и использования таких характеристик, как углы главных направлений φ_{Z1}, φ_{Z2}, φ_{Z3}. Эти углы в отличие от углов γ_{p1}, γ_{p2}, γ_{p3} также характеризуют наклон, но уже не по отношению к полному напряжению p_o, а к координатным осям *X*, *Y*, *Z*, т.е., например, для главного направления 1: $\varphi_{Z1} = \gamma_{p1} + \varphi$ (16). Тогда условие пластичности (48) может быть записано в следующем, но также в общем виде:

$$\frac{\cos(\varphi_{Z1} - \varphi)}{\cos\varphi}\sigma_{Z0} - \frac{\cos\gamma_{32}}{\cos\theta}\frac{\sin(\varphi_{Z1} - \varphi)}{\sin\varphi}\sigma_{X0} = \sigma_{s13}. \quad (49)$$

При выполнении анализа напряженного или деформированного состояния самого тела и его отдельной точки возникают вопросы, связанные с переходом от одного уровня представления к другому (с системами координат и соответствующими преобразованиями).

При анализе напряженного состояния элементарного объема на первом уровне представления, т.е. в главных нормальных напряжениях, как это показано на рис. 8, осесимметричное напряженное состояние может присутствовать дважды. Первый раз – когда с учетом условия (3) выполняется равенство $\sigma_2 = \sigma_3$, а второй – когда $\sigma_2 = \sigma_1$. Это происходит тогда, когда углы γ_{23} и γ_{32}, т.е. углы между соответствующими главными напряжениями σ_2 и σ_3, и их результирующей σ_{23}, в сумме представляющие прямой угол:

$$\gamma_{23} + \gamma_{32} = \pi/2;\ \gamma_{23} = \pi/4 - \gamma_{s31};\ \gamma_{32} = \pi/4 + \gamma_{s31} \quad (50)$$

принимают крайние значения, например,

$$\pi/4 \le \gamma_{32} \le \operatorname{arctg}(\sigma_1/\sigma_3) \text{ или}$$

$$\pi/4 \le \gamma_{32} \le \pi/4 + \gamma_{s13}. \quad (51)$$

В элементарном объеме напряженное состояние, соответствующее плоскому деформированному состоянию, должно отвечать условию

$$\sigma_{2П} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2 + \sigma_3^2}{2}}, \quad (52)$$

откуда следует, что

$$\gamma_{32П} = \operatorname{arctg}\left(\frac{\sigma_{2П}}{\sigma_3}\right) = \operatorname{arc\,tg}\sqrt{\frac{\sigma_1^2 + \sigma_3^2}{2\,\sigma_3^2}} = \operatorname{arctg}\sqrt{\frac{1 + \operatorname{tg}^2\gamma_{13}}{2}} = \operatorname{arctg}\left(\frac{\sqrt{2}}{\cos\gamma_{13}}\right). \quad (53)$$

Поскольку условия, соответствующие плоскому деформированному состоянию, сформулированы и могут быть определены с помощью формул (52) и (53) сделаем замечание по поводу неравенства (3), устанавливающего пределы изменения среднего главного нормального напряжения σ_2.

На практике при использовании оборудования, методов пластического деформирования и жесткого инструмента, которые принято относить к традиционным, среднее напряжение σ_2 будет ограничиваться условием $\sigma_{2П} \ge \sigma_2 \ge \sigma_3$. Так, например, происходит при осадке достаточно длинной полосы, когда на расстоянии, достаточно удаленном от ее концов, возникает плоское деформированное состояние, т.е. пластическая деформация в направлении длины отсутствует, а напряжение $\sigma_{2П}$ находится в пределах упругости или не достигает величины, требуемой для выполнения условия пластичности.

Однако при использовании специализированных и специальных процессов обработки металлов давлением, например, при гидростатическом прессовании, возможно обеспечение условий, когда $\sigma_1 \ge \sigma_2 \ge \sigma_{2П}$, что позволяет повысить ресурс пластичности и допус-

тимую величину пластической деформации, не приводящую к разрушению.

При решении задач, когда имеет место осесимметричное напряженное состояние тела, а направления цилиндрических координат соответствующим образом совпадают с координатами, выбранными для анализа элементарного объема, то условие (49) принимает следующий вид:

$$\frac{\cos(\varphi_{Z1}-\varphi)}{\cos\varphi}\sigma_{Z0}-\frac{\sin(\varphi_{Z1}-\varphi)}{\sin\varphi}\sigma_{\rho 0}=\sigma_{s13}, \quad (54)$$

а при решении задач, когда для тела имеет место плоское деформированное состояние, условие (48) может быть использовано в виде

$$\frac{\cos(\varphi_{Z1}-\varphi)}{\cos\varphi}\sigma_{Z0}-\frac{1}{\sqrt{2}}\frac{\sin(\varphi_{Z1}-\varphi)}{\sin\varphi}\sigma_{X0}=\sigma_{s13}. \quad (55)$$

Таким образом, при анализе напряженного состояния с помощью главных напряжений второго уровня представления, так же как и на основании главных напряжений первого уровня, возникает необходимость их привязки к главным направлениям, в том числе для обеспечения возможности анализа деформированного состояния.

Третьим уровнем, в соответствии с выражением (41), можно считать дальнейшее разложение главных нормальных напряжений σ_1, σ_2 и σ_3 на их составляющие, но уже не только на нормальные и отнесенные к осям координат *X*, *Y*, *Z*, но и по существующей терминологии на нормальные и касательные напряжения. Тогда функция $T_{\sigma C3}$ принимает следующий вид:

$$\begin{aligned}T_{\sigma c3}=&(\cos\varphi_{Z1}\cdot\cos\varphi_{Z2}\cdot\cos\varphi_{Z3}+\sin\varphi_{Z1}\cdot\sin\varphi_{Z2}\cdot\sin\varphi_{Z3}\cdot\sin\theta\cdot\cos\theta\cdot(\sin\theta+\cos\theta)-\\&-\sin\varphi_{Z1}\cdot\sin\varphi_{Z2}\cdot\cos\varphi_{Z3}\cdot\sin^2\theta-\sin\varphi_{Z1}\cdot\cos\varphi_{Z2}\cdot\sin\varphi_{Z3}\cdot\cos^2\theta-\\&-\cos\varphi_{Z1}\cdot\sin\varphi_{Z2}\cdot\sin\varphi_{Z3}\cdot\sin\theta\cdot\cos\theta)/\cos\gamma_{p1}\cdot\cos\gamma_{p2}\cdot\cos\gamma_{p3}.\end{aligned} \quad (56)$$

Условие пластичности (40) на рассматриваемом уровне может быть записано в следующем виде:

$$\sigma_1-\sigma_3=\frac{\sigma_Z}{\cos\varphi_{Z1}}-\frac{\sigma_X}{\sin\gamma_{23}\cdot\cos\theta}=\sigma_{s13}. \quad (57)$$

Условие пластичности (57) является удобным при решении задач, когда для рассматриваемого тела или его сечений имеют место такие частные случаи, как плоское деформированное или осесимметричное напряженное состояние, так как в этих случаях оно полностью соответствует точному условию пластичности в главных нормальных напряжениях (40). Его дальнейшее упрощение и практическое использование для этих целей, так же как и задачи, связанные с нахождением угла φ_{Z1} и других параметров, предполагается рассмотреть в продолжении данной работы.

Из анализа, выполненного выше, следует, что для определения напряженного и деформированного состояния в точке такой путь, как решение дифференциального уравнения равновесия, не является единственно возможным, тем более рациональным и тем более в частных производных, а также при большом числе неизвестных в виде касательных напряжений. Для элементарного объема вместо уравнения равновесия могут быть использованы уравнения типа (1) и (2), описывающие напряженное и деформированное состояние.

Таким образом, условие пластичности должно быть использовано не только как условие, дополняющее систему уравнений равновесия напряженного состояния, но и для решения таких сложных вопросов, как установление застойных областей и областей пластической деформации и их границ, а также для назначения граничных условий.

Поэтому представление условия пластичности в такой же компактной форме, как (40), не обязательно, так же как и то, что условие пластичности может быть представлено только в напряжениях – (17), (18), (39), (40) и др., но и, например, может выражаться в угловом измерении (11), (12) или тригонометрических функциях этих углов (6)–(8). Они с точки зрения геометрического смысла качественно и наглядно характеризуют степень искажения сферической поверхности и трансформации ее в поверхность эллипсоида, необходимую для перехода от упругого состояния в упругопластическое состояние.

Представленные в данном теоретическом исследовании результаты математического моделирования, в том числе условия пластичности, позволяют переходить не только из одной размерности задачи в другую, но из одного уровня представления в другой.

Несмотря на практическую необходимость использования результатов анализа напряженного и деформированного состояния в трехмерном пространстве, стремление решить эти задачи сразу также в трехмерном пространстве скорее всего не является рациональным.

С учетом инвариантности напряженного и деформированного состояния, т.е. независимости от выбранной системы координат, а также от размерности представления: линейной; плоской или объемной и уровня представления: в главных нормальных напряжениях; в нормальных напряжениях; в нормальных и касательных напряжениях; с использованием главных касательных напряжений; рациональным может быть поэтапный подход, который заключается в том, что сначала формулируется и решается плоская задача, а ее результаты служат в качестве исходных данных для пересчета в объемную.

По результатам математического моделирования видно, что во многих предлагаемых формулах для их практического применения должен быть в соответствии с формулой (16) известен угол φ_{Z1}, который может быть определен исходя из свойств и на основании метода траекторий главных направлений (нормальных напряжений и деформаций) [7].

Приведенный выше анализ напряженного состояния в элементарном объеме (конечном элементе или точке) позволяет сформулировать основные результаты выполненной работы, обозначить направления для продолжения и развития теоретических исследований и определить очередные узловые задачи.

Общие выводы

1. Выполнено исследование ряда свойств и особенностей, присущих в отличие от деформируемого тела только элементарному объему, что заставило отступить от некоторых традиционных представлений и подходов к анализу напряженного и деформированного состояния в точке.

2. Анализ напряженного состояния с помощью главных напряжений первого уровня, выполненный на основании более детального учета влияния фактора упругости, позволил получить условие пластичности (39) и в результате этого сделать выводы о том, что среднее главное нормальное напряжение σ_2 не оказывает непосредственного влияния на требуемое напряжение текучести $\sigma_{s\,13}$. Условие пластичности Треска–Сен-Венана (40), как и считал Мизес, является точным и достаточным.

3. Показаны возможности представления и анализа напряженного состояния в трехмерном пространстве на трех уровнях: при разложении полного напряжения в точке p_o по главным направлениям при разложении полного напряжения по ортогональным координатным осям X, Y, Z при дальнейшем разложении главных нормальных напряжений σ_1, σ_2 и σ_3 на координатные оси, т.е. на девять компонент, шесть из которых принято называть касательными.

4. Показана реальная возможность перерасчета компонент напряжений, представленных на любом из исследованных выше уровней и перехода от полного напряжения, а также от одного уровня к другому с помощью функций: $T_{\sigma_{C1}}, T_{\sigma_{C2}}, T_{\sigma_{C3}}$ – (43), (47) и (56), соответствующих величине и характеру преобразования, т.е. в соответствующую систему координат и форму представления и соответствующие им формы записи условия пластичности.

5. Результаты теоретических исследований являются достаточными для перехода к следующей узловой задаче, т.е. к анализу деформированного состояния в элементарном объеме. Они показали, что для их реального практического использования необходимо знать или уметь определять углы поворота главных направлений по отношению к осям координат φ_{Z1} и, следовательно, φ_{23}. Для этого выполнена разработка и проводится совершенствование метода траекторий главных направлений (нормальных напряжений и деформаций), что позволяет определять эти углы поворота в любой точке тела, а следовательно, напряженное и деформированное состояние.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

6. **Мамаев В.Б., Мамаев М.В.** Анализ напряженного состояния при пластической деформации элементарного объема тела // Наукоемкие технологии в машиностроении и авиастроении: материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. В 2 ч. Рыбинск: РГАТУ им. П.А. Соловьева, 2012. Ч. II. С. 127–132.

7. **Мамаев В.Б., Мамаев М.В.** Разработка основ метода траекторий главных напряжений // Наукоемкие технологии в машиностроении и авиастроении: материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. В 2 ч. Рыбинск: РГАТУ им. П.А. Соловьева, 2012. Ч. II. С. 132–137.

Владимир Борисович Мамаев, канд. техн. наук,
vmamaev51@yandex.ru;
Михаил Владимирович Мамаев

УДК 621.431.75

В.Г. Панин *(Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет))*

Анализ точности раскатных заготовок для кольцевых деталей двигателей "НК"

Исследована точность раскатных заготовок авиационного назначения статистическим методом в ОАО "Кузнецов" (г. Самара). Показана действительная точность горячего формообразования заготовок колец для двигателей "НК". Рассчитано среднеквадратическое отклонение размеров от центра группирования, построены практическая и теоретическая кривые распределения.

Ключевые слова: точность; профиль; погрешность; размах; частость; отклонение; частота; рассеивание.

The accuracy of roll-off pieces of aviation destination by statistical method in JSC "Kuznetsov" (Samara) is studied. The actual accuracy of the hot forming blanks rings for engines "NC" is shown. Standard deviation of the sizes of the center of the grouping is calculated, practical and theoretical distribution curves are given.

Keywords: accuracy; profile; accuracy; range; relative frequency; deviation; frequency; dispersion.

В 1970-х гг. в ОАО "Кузнецов" (г. Самара) разработан и постоянно совершенствуется высокоэффективный технологический процесс формообразования бесшовных кольцевых заготовок, имеющих прямоугольную форму поперечного сечения или фасонный профиль, на раскатных машинах типа РМ (рис. 1, 2).

Каждая кольцевая заготовка, полученная горячей раскаткой, характеризуется геометрическими и дру-

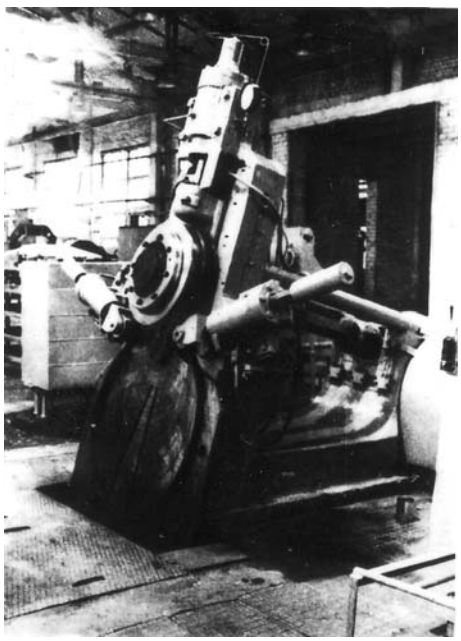


Рис. 1. Раскатная машина РМ-1200 (разработчики: ВИЛС, ОАО "Кузнецов"):
диаметры раскатываемых колец 250...1200 мм; ширина колец до 100 мм; сила нажимного устройства 300 кН

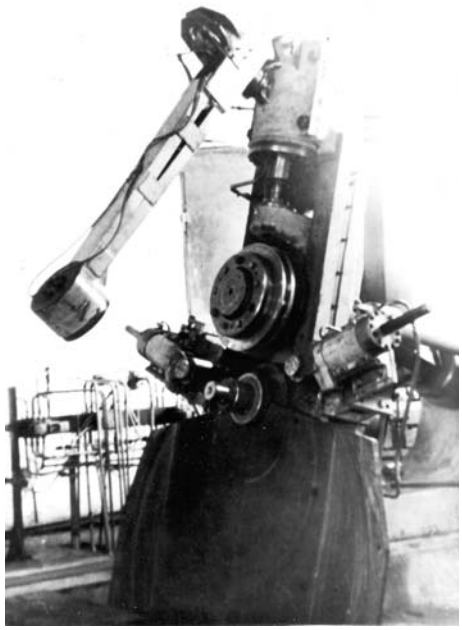


Рис. 2. Раскатная машина РМ-2000 (разработчик ОАО "Кузнецов"):
диаметры раскатываемых колец 400...2000 мм; ширина колец до 150 мм; ширина колец до 60 мм

гими параметрами, определяющими химический состав и физико-механические свойства материала (масса кольца, овальность, шероховатость поверхности, наличие или отсутствие альфированного слоя для колец из титановых сплавов и т.д.), которые технолог считает необходимым задать в чертеже и технических требованиях.

Для стимулирования работ и контроля за ходом внедрения прогрессивных процессов производства заготовок в рабочие чертежи чистовых деталей вводится значение *коэффициента использования заготовки* (КИЗ). Помимо КИЗ одним из главных параметров кольцевых заготовок является точность – степень соответствия действительных, полученных после формообразования геометрических параметров раскатных колец, заданным геометрическим параметрам (размеры, форма и взаимное расположение поверхностей деталей).

Целью работы является освоение методики статистического исследования точности кольцевых заготовок, полученных при горячем формообразовании на раскатных машинах.

Чертеж раскатной заготовки разрабатывается по конструкторскому чертежу детали: вычерчивается профиль кольцевой заготовки в соответствии с технологическими возможностями имеющегося кольцераскатного оборудования, предусматриваются необходимые припуски на механическую обработку, записываются технические требования, чертеж согласовывается с технологом механического цеха.

Производственными погрешностями, влияющими на точность горячей раскатки, являются: неточности при изготовлении деформирующего инструмента, неточности исходной заготовки, неоформление профиля, деформация от внутренних напряжений, неточности установки контрольного приспособления, неточности измерения размера и др.

В качестве примера рассмотрим начальный этап проектирования технологического процесса. На рис. 3 показана профильная раскатная заготовка для промежуточного кольца турбины, материал ХН68ВМТЮК-ВД (ЭП693-ВД).

Ниже приведены значения оптимального припуска, отклонения на диаметральные и горизонтальные размеры кольца, рассчитанные с помощью заводской нормали ЗН359-79, в которой содержатся данные в виде таблиц по выбору припусков, напусков, уклонов, радиусов переходов, коробления и овала, допускаемых отклонений на размеры и массу заготовки. Данные приведены для типового кольцевого профиля обычной точности, т.е. полученная при раскатке колец без калибрующих операций.

Точный раскат по ТУ 01-1203, гр. контроля – 3; термическая обработка 285...353 НВ; неуказанные радиусы 3 мм; овальность 4 мм.

Глубина поверхностных дефектов меньше или равна половине фактического припуска на механическую обработку.

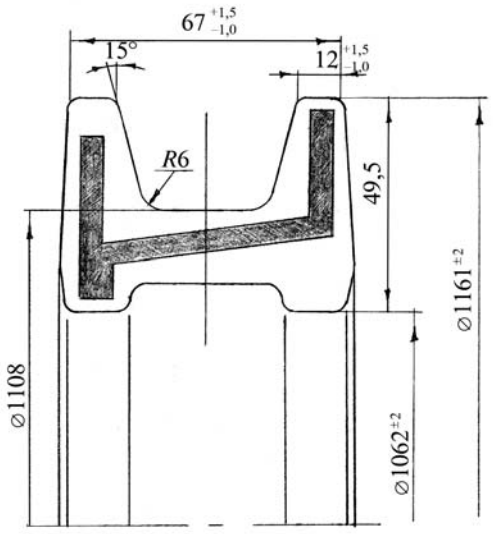


Рис. 3. Профильная заготовка

1. Припуск для механической обработки 3 мм.

2. Уклоны $\alpha = (3\pm1)°$, внутренний радиус $R = 6^{+3,5}_{-2}$ мм.

3. Допуск на массу заготовки $\Delta G = \Delta V\, j = 0{,}221 \cdot 8{,}54 = 1{,}89$ кг, где $\Delta V = \frac{D_i}{D_{\min}} \Delta V_{\min}$ – фактическое превышение объема кольца; $j = 8{,}54$ – удельная масса сплава; D_i, $D_{\min}$ – диаметральные размеры кольца.

4. Диаметральные погрешности:

на диаметр 1161 мм

$$+D_\Sigma = \Delta D_1 + 2\Delta D_2 + \Delta D_3 = +7 \text{ мм};$$
$$-\Delta D_\Sigma = -\Delta D_1 = -2 \text{ мм},$$

где ΔD_1 – допуск на диаметральные размеры профиля; ΔD_2 – допуск на вертикальные размеры профиля;

$$\Delta D_2 = \Delta D_{2\max} (\Delta V_{\min} / \Delta V_{\max}) = 1{,}5 \text{ мм},$$

где $\Delta D_{2\max}$ – максимальный допуск на вертикальные размеры; $\Delta V_{\min}$ и $\Delta V_{\max}$ – минимальный и максимальный допуски на объем кольца; ΔD_3 – допуск на овальность кольца;

на диаметр 1062 мм

$$+D_\Sigma = +2 \text{ мм}; \quad -D_\Sigma = -4 \text{ мм};$$

односторонние припуски с учетом допустимой глубины поверхностных дефектов

на диаметр 1161 мм

$$a_{\max} = 6{,}5 \text{ мм}; \quad a_{\min} = 1 \text{ мм};$$

погрешности на горизонтальные размеры

$$\Delta B_\Sigma = \Delta B_1 + \Delta B_2 ,$$

где ΔB_1 – допуск на износ оснастки; ΔB_2 – допуск на торцевое коробление; $+\Delta B_\Sigma = +3$ мм; $-\Delta B_\Sigma = -1$ мм;

односторонние припуски с учетом допустимой глубины поверхностных дефектов на размеры 67 и 12 мм:

$$a_{max} = 4{,}5 \text{ мм}; \quad a_{min} = 1{,}25 \text{ мм}.$$

Точность обработки колец с расчетными размерами будет соответствовать 15-му квалитету точности ЕСДП СЭВ (8-й класс точности по ОСТ 1010-16 и ГОСТ 2689–54).

Состояние поверхности колец после обдувки электрокорундом – параметр шероховатости поверхности *Ra* ~3,2...6,3 мкм по ГОСТ 2.309–73 и ГОСТ 2789–73 (∇3–5 класс шероховатости).

Известно, что статистический метод позволяет оценить действие в данной операции сразу всей совокупности факторов. При этом нет необходимости проводить эксперименты по выявлению влияния отдельных факторов на точность обработки; достаточно на основе непосредственного наблюдения на производстве по заданному геометрическому параметру измерить партию деталей.

Для упрощения расчетов и построения кривых распределения размах варьирования *R* делят на интервалы, число интервалов *K* зависит от числа деталей *N*, взятых для статистического анализа.

На моторостроительном заводе число раскатных колец одного наименования в единовременной партии не превышает $N = 8...10$ ($N < 50$), запускать в производство только для анализа опытную партию колец, бóльшим количеством, дорого.

1. Исходные данные

Наружный диаметр кольца *D*, мм	Допуск на диаметр *D*, мм		Припуск на механическую обработку, мм
	для идеально круглого кольца	с учетом овала	
250...450	±2	+4 –2	3
450...700	±2	+4 –2	4
700...1000	±3	+4 –2	4
1000...1400	±4	+4 –2	5

На первом этапе исследований исходные данные для расчета брали из заводской нормали ЗН359–79, где вся номенклатура раскатных колец разбита на 4 группы (табл. 1).

Проводили обмеры по наружному диаметру раскатных колец общим количеством $N_0 = 67$, изготовленных для кольцевых деталей газотурбинных двигателей (ГТД) – "НК-37", "НК-38" и "НК-93" за 1 месяц. Число колец диаметром 250...450 мм составило $N_1 = 26$, диаметром 450...700 мм – $N_2 = 19$, диаметром 700...1400 мм – $N_3 + N_4 = 22$. Обмер колец осуществляли штангенциркулем с ценой деления 0,1 мм.

Полученные результаты для колец с диаметром 250...450 мм, $N_1 = 26$ приведены в табл. 2.

Провели статистическую обработку данных значений отклонений фактического диаметра раскатного

2. Наружный диаметр раскатных колец

Номер заготовки	Наружный диаметр кольца *D*, мм		Номер заготовки	Наружный диаметр кольца *D*, мм	
	номинальный	фактический		номинальный	фактический
1	365	365	14	348	350
2	395	397	15	404	404
3	395	397	16	404	406
4	395	395	17	436	436
5	395	398	18	428	430
6	355	352	19	415	415
7	281	285	20	416	416
8	355	356	21	411	411
9	315	318	22	442	442
10	315	317	23	372	372
11	374	377	24	432	432
12	352	353	25	380	380
13	348	348	26	442	442

3. Отклонения фактического диаметра раскатного кольца от номинального

Номер интервала	Граница интервалов		Число точек	Частота, %
1	–4,0	–3,0	0,5	1,92
2	–3,0	–2,0	1,0	3,85
3	–2,0	–1,0	0,5	1,92
4	–1,0	0,0	2,5	9,62
5	0,0	1,0	5,0	19,23
6	1,0	2,0	7,0	26,92
7	2,0	3,0	6,0	23,08
8	3,0	4,0	2,5	9,62
9	4,0	5,0	1,0	3,85

кольца от номинального x. Результаты представлены в табл. 3. Минимальное значение $x_{min} = -3{,}0$; максимальное значение $x_{max} = 4{,}0$; среднее значение $\bar{x} = 1{,}33$; среднеквадратическое отклонение $\sigma = 1{,}60$; поле рассеивания $\nu = 9$. Число интервалов для данной партии деталей приняли $K = 9$ и получившееся поле рассеивания разделили на 9 равных интервалов и в выбранном масштабе изобразили на оси абсцисс $(-x, +x)$, затем подсчитали называемое частотой количество значений отклонений (колец), попавших в каждый из интервалов, выбрали масштаб по оси ординат и из середины каждого интервала, отложили соответственную частоту в виде отрезка, масштаб абсциссы и ординаты выбирали произвольно. Соединили концы отрезков, получили ломаную линию – практическую кривую распределения (рис. 4).

На рис. 5 показана практическая кривая распределения, построенная для контрольной партии колец $N_0 = 67$. Число интервалов $K = 11$; $x_{min} = -4{,}5$; $x_{max} = 5{,}0$; $\bar{x} = 1{,}17$; $\sigma = 1{,}60$; $\nu = 11$. Данные по замерам контрольной партии колец и таблица частот в статье не приведены, так как принцип построения аналогичный описанному выше.

При безгранично большом числе раскатных колец число интервалов было бы безграничным, а ломаная линия превратилась в плавную кривую и изображала закон распределения отклонений.

Целью исследования было выявить действительную точность производства контрольной партии бесшовных колец по заданным предельным отклонениям на наружный диаметр. Построение выполнено так, что непосредственно видно не только распределение отклонений в поле рассеивания, но и их распределение в поле допуска, 10 колец – брак (поле рассеивания превышает поле допуска), но увеличенный припуск по наружному диаметру обычно относится к исправимому браку, поэтому процент брака для данной партии может быть 7,5 %.

В данном случае производство бесшовных колец осуществляется по схеме: резка прутка в меру + свободная ковка + горячая раскатка и для определения точности действительных размеров раскатанных колец в партии ($T_д = \nu$, где $T_д$ – действительная точность) раскатали партию заготовок (число $N = 8$) из хромоникелевого сплава ХН73МБТЮ в одной паре валков на раскатной машине РМ-1200.

При выполнении эксперимента использовали приборы, проходившие регулярную проверку. Обеспечивалось постоянство условий по температуре, числу оборотов в минуту и подаче нажимного валка, что позволило свести к минимуму систематические ошибки измерения. Из-за овальности на раскатных заготовках

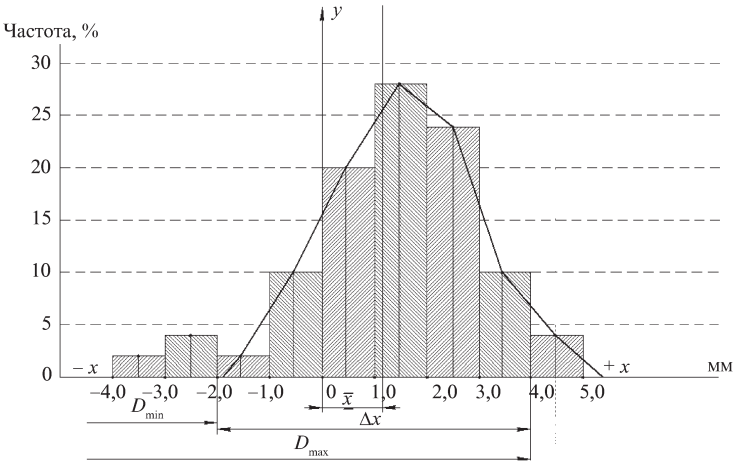


Рис. 4. Практическая кривая распределения ($N_1 = 26$)

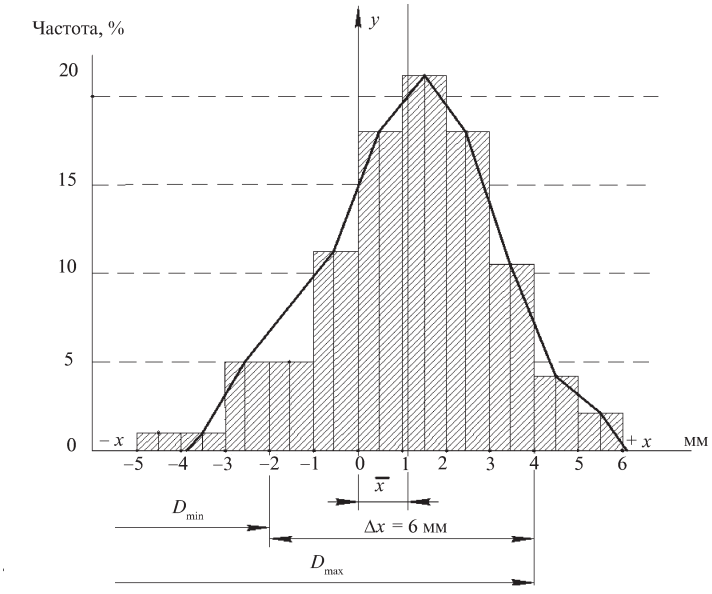


Рис. 5. Практическая кривая распределения ($N_0 = 67$)

4. Результаты измерений

Номер заготовки	x_i
1	594,7
2	594,0
3	592,5
4	591,5
5	595,2
6	594,6
7	595,8
8	594,7
1	594,4
2	593,2
3	592,0
4	591,2
5	594,4
6	593,2
7	592,0
8	590,8

определяли для каждого кольца максимальный и минимальный наружный диаметр. В качестве настроечного размера принят средний размер поля допуска $x_{\text{н.р}} = x_{\delta\,\text{ср}} = 593$ мм.

Полученные кольца прямоугольной формы измеряли штангенциркулем с ценой деления 0,1 мм, результаты измерений приведены в табл. 4.

Определили размах варьирования $R = x_{\max} - x_{\min} = 595{,}8 - 590{,}8 = 5$ мм, число интервалов принято $K = 7$, так как $N < 50$, величина интервала $C = 5 : 7 = 0{,}714$, приняли $C = 0{,}7$ мм. Определили границы интервалов

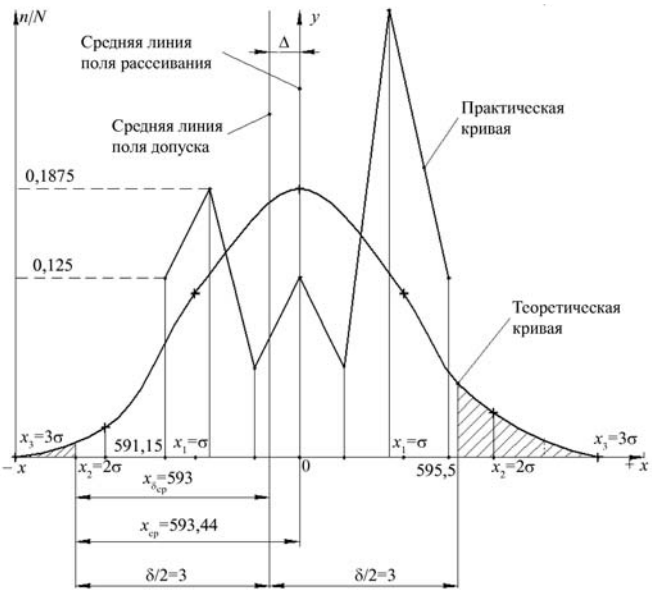


Рис. 6. Практическая кривая и кривая нормального распределения

$x_{\min} + C$, среднее значение каждого интервала, рассчитали количество случаев и частость. Полученные расчетные данные представлены в табл. 5.

По полученным значениям $x_{i\,\text{ср}}$ и n_i / N построили практическую кривую распределения в масштабе 480:1 (рис. 6). Для более точной оценки точности обработки практическую кривую заменили теоретической, изображающей определенный закон распределения случайных величин. Для ее построения вычислили две характеристики: $x_{\text{ср}} = 593{,}44$ мм и $\sigma = 1{,}528$ мм.

Приняли одинаковый масштаб при построении практической и теоретической кривой для значений C и σ. По известной методике (см. кн. Кассандрова О.Н., Лебедев В.В. Обработка результатов. М.: Нау-

5. Средние значения интервалов и частость

Номер интервала	Границы интервалов	Средний размер интервала $x_{i\,\text{ср}}$	Частота n_i	Частость n_i / N
1	590,8...591,5	591,15	2	0,1250
2	591,5...592,2	591,85	3	0,1875
3	592,2...592,9	592,55	1	0,0625
4	592,9...593,6	593,25	2	0,1250
5	593,6...594,3	593,95	1	0,0625
6	594,3...595,0	594,65	5	0,3125
7	595,0...596,0	595,50	2	0,1250

6. Ординаты теоретической кривой

x в долях σ	y_m	$y_m = y_m\, b_m$
0	0,399	87,78
0,5	0,352	77,44
1,0	0,242	53,24
1,5	0,130	28,60
2,0	0,054	11,88
2,5	0,018	3,96
3,0	0,004	0,88

ка, 1970. 108 с.) определяли ординаты теоретической кривой, полученные результаты приведены в табл. 6.

В пределах ±3σ под кривой нормального распределения заключено 99,73 % всей ее площади, поэтому погрешность от случайных и закономерно изменяющихся факторов составила: $\omega_р = 6\sigma = 9{,}168$.

Постоянная систематическая погрешность в данном случае вызывается овальностью колец Δ, т.е. несовпадением среднего размера поля рассеивания $x_{ср}$ со средним значением поля допуска $x_{\delta ср}$: $\Delta = x_{ср} - x_{\delta ср} = 0{,}44$ и в общем случае постоянная погрешность $\Delta_п = 2\Delta = 0{,}88$; результирующая операционная погрешность: $\omega_\Sigma = \omega_р + \Delta_п = 10{,}048$.

Заключение. Производственные погрешности неоднородны. Наибольшая из погрешностей партии деталей равна: $3\sigma + \Delta = 5{,}024$. Постоянная погрешность $\Delta > 0{,}5\,\sigma$.

Кольцевые заготовки, полученные горячей раскаткой, соответствуют заданной точности. Для уменьшения погрешности обработки необходимо введение калибрующих операций.

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

ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УЧЕБНИК **В.Ф. Безъязычный**

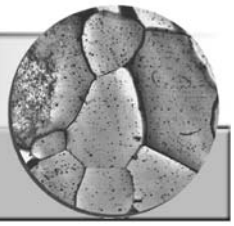
2013 г. Объем 568 с. Формат 60x88 1/16 Переплет ISBN 978-5-94275-669-7 Цена 1000 р.

Изложены основы технологии машиностроения в соответствии с программой учебного курса. Даны основные понятия и положения, основы базирования, основы проектирования технологических процессов, общие принципы обработки деталей, причины возникновения погрешностей при механической обработке. Приведены расчет режимов резания, методика выбора способа обработки деталей, основы технического нормирования, пути повышения производительности станочных операций. Показана последовательность проектирования технологических процессов сборки.

Для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров «Конструкторско-технологическое обеспечение».

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:

по почте: 107076, г. Москва, Стромынский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительная информация по телефонам: (499) 269-52-98, 269-66-00 и на сайте WWW.MASHIN.RU



УДК 621.745.043

А.А. Жуков, О.В. Немтырев, Л.А. Хасанова *(Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева)*

Исследование коррозионной стойкости сталей для пресс-форм литья под давлением

Выявлены закономерности процессов физико-химического взаимодействия материала пресс-форм применительно к хромистой стали 20Х13Л, а также к сталям, разработанным на ее основе и дополнительно легированным ванадием, азотом и алюминием. Это позволило сформулировать адекватные математические модели процессов. Показано, что коррозионная стойкость стали 20Х10АЮФЛ является наиболее высокой среди всех исследованных сталей, что с учетом уровня других ее важнейших механических и эксплуатационных свойств позволяет ее использовать для изготовления наиболее ответственных деталей пресс-форм литья под давлением алюминиевых сплавов взамен штамповых сталей.

Ключевые слова: коррозионная стойкость; хромистая сталь; штамповая сталь; физико-химическое взаимодействие; пресс-форма; литье под давлением; оригинальная установка.

Regularities of processes of physical and chemical interaction of material of compression moulds in relation to chromic steel 20Kh13L, and also steels developed on its basis and in addition alloyed vanadium, nitrogen and aluminum are revealed. It allowed to formulate adequate mathematical models of processes. It is shown that corrosion firmness of steel 20Kh10AYuFL is the highest among all investigated steel that, taking into account level of other its major mechanical and operational properties allows to use it for production of the most responsible details for compression moulds of aluminum alloys in exchange die steels.

Keywords: corrosion resistance; chromic steel; die steel; physical and chemical interaction; compression mould; molding under pressure; original installation.

Пресс-формы работают в условиях жестких *циклических температурно-силовых воздействий* (ЦТСВ) и динамического физико-химического взаимодействия с расплавом. Поэтому к сталям для наиболее ответственных деталей пресс-форм предъявляют высокие требования по теплостойкости, разгаростойкости и коррозионной стойкости. В соответствии с ГОСТ 19946–74 пресс-формы *литья под давлением* (ЛПД) алюминиевых сплавов должны выдерживать не менее 25 000 запрессовок без снижения качества отливок.

Среди факторов, снижающих работоспособность пресс-форм ЛПД, особое значение должно придаваться процессам физико-химического взаимодействия расплава с рабочими поверхностями пресс-формы, интенсивность развития которых определяется коррозионной стойкостью материала пресс-форм.

Разрушение рабочих поверхностей пресс-формы прежде всего происходит в местах наиболее интенсивного взаимодействия потока расплава с пресс-формой. Данный факт указывает, что на тепловую структурную стабильность и эксплуатационную стойкость сталей для пресс-форм ЛПД не меньше, чем процессы термоусталости, влияют также процессы износа (растворения) материала пресс-формы в потоке расплава.

Штамповые стали, из которых традиционно изготовляют наиболее ответственные детали пресс-форм ЛПД, имеют недостаточную стойкость при эксплуатации пресс-форм. Одной из основных причин этого является недостаточная коррозионная стойкость таких сталей. Наиболее рациональным способом ее повышения является разработка литейных хромистых сталей на базе 20Х13Л с повышенным уровнем эксплуатационных свойств.

Основными преимуществами базовой стали 20Х13Л являются: высокая коррозионная стойкость и отсутствие дорогостоящих легирующих элементов, а недостатками – низкая разгаростойкость и, особенно, теплостойкость, что не позволяет использовать их для изготовления пресс-форм без подбора дополнительного легирующего комплекса.

При разработке легирующего комплекса стали 20Х13Л, который обеспечивает необходимое сочетание эксплуатационной стойкости и тепловой структурной стабильности, практический интерес имеет исследование процессов физико-химического взаимодействия разрабатываемых сталей с алюминиевым расплавом и определение коррозионной стойкости.

Плавки сталей проводили по принципу последовательного увеличения количества легирующих элементов. Плавка № 1 соответствует стали 20Х13Л; плавка № 2 – стали 20Х10Л; плавки № 3–6 отличаются от плавки № 2 дополнительным легированием ванадием; плавки № 7–9 – ванадием и азотом; плавки № 10–13 – ванадием, азотом и алюминием; плавки № 14–20 – ванадием, азотом, бором и церием (сталь 20Х10АЮФЛ).

Было проведено 20 плавок. Химический состав исследуемых сталей представлен в табл. 1.

Для исследования процессов растворения различных материалов, в том числе сталей, в условиях статического и динамического взаимодействия с расплавами (соответствующих условиям эксплуатации пресс-форм ЛПД) в РГАТУ им. П.А. Соловьева была спроектирована и изготовлена оригинальная установка. Схема конструкции установки представлена на рис. 1.

Основными узлами данной установки являются:

1 – печь СШОЛ-1.1,6/П-М1;

2 – механизм опускания и извлечения образца *3* из тигля с расплавом *4*;

5 – электропривод вращения образца ЭТО-1;

6 – узел крепления образца на валу электродвигателя;

7 – блок измерения угловой скорости вращения образца;

8 – блок контрольно-измерительной аппаратуры и управления.

Механизм опускания и извлечения образца состоит из направляющей *9*, по которой с помощью маховика *10* и вала *11* перемещается каретка *12* с закрепленным на ней двигателем.

Электропривод ЭТО-1 обеспечивает плавное регулирование частоты вращения вала электродвигателя от 1800 до 3600 мин$^{-1}$. Для измерения угловой скорости вращения образца на вал двигателя установлена диск-шторка Ш с отверстиями, при вращении которой подается сигнал на фотоэлектрический датчик ФДП, связанный с цифровым тахогенератором ЦАТ-2М. При испытании цилиндрических образцов с наружным диаметром d = 25 мм окружная скорость омывания образцов расплавом составляет $v_{окр}$ = 0,1...5,0 м/с.

При исследовании режимов работы установки на моделирующей жидкости (вода) установлено, что при числе оборотов от 1300 до 1700 мин$^{-1}$ ламинарный ре-

1. Химический состав исследуемых сталей (основа – Fe), % мас.

Номер плавки	C	Cr	V	N	Al	B	Ce	Si	Mn
1	0,20	13,0	–	–	–	–	–	0,30	0,40
2	0,20	10,0	–	–	–	–	–	0,35	0,45
3	0,19	9,8	0,60	–	–	–	–	0,40	0,50
4	0,18	9,50	0,70	–	–	–	–	0,30	0,50
5	0,19	9,80	0,90	–	–	–	–	0,35	0,35
6	0,20	9,30	1,10	–	–	–	–	0,40	0,50
7	0,19	9,60	1,00	0,12	–	–	–	0,35	0,40
8	0,19	9,70	0,85	0,14	–	–	–	0,40	0,40
9	0,20	9,60	0,80	0,15	–	–	–	0,40	0,45
10	0,18	9,40	0,80	0,10	0,70	–	–	0,30	0,30
11	0,21	10,20	1,20	0,15	0,80	–	–	0,40	0,45
12	0,19	9,90	0,80	0,14	0,75	–	–	0,35	0,45
13	0,80	10,00	0,83	0,15	0,70	–	–	0,40	0,50
14	0,19	9,60	0,90	0,13	0,75	0,08	0,06	0,40	0,40
15	0,22	9,50	0,95	0,11	1,00	0,10	0,075	0,30	0,30
16	0,21	10,50	0,80	0,15	0,70	0,09	0,07	0,40	0,60
17	0,20	11,00	0,75	0,13	0,75	0,08	0,06	0,40	0,40
18	0,20	9,70	0,90	0,15	0,70	0,09	0,07	0,30	0,30
19	0,19	9,80	0,88	0,14	0,71	0,08	0,06	0,40	0,40
20	0,20	9,70	0,92	0,13	0,85	0,08	0,07	0,40	0,45

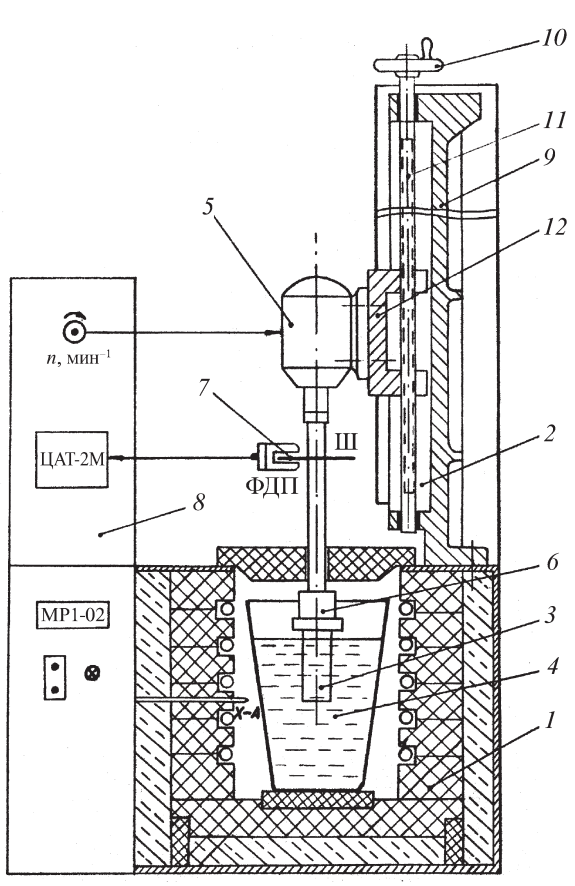


Рис. 1. Схема конструкции установки для исследования процессов растворения

жим течения жидкости переходит в турбулентный. Это соответствует окружной скорости $v_{окр}$ = 1,5...2,5 м/с и согласуется с теоретически рассчитанной скоростью по числу Рейнольдса Re = 2300.

Печь СШОЛ-1.1,6/П-М1 обеспечивает максимальную температуру расплава 1000 °С. В рабочее пространство печи устанавливали графитовый тигель диаметром 100 мм и высотой 180 мм. При использовании алюминиевого расплава АК12 масса жидкого металла составляет 2,5 кг.

При достижении заданной температуры, которая контролируется термопарой Х–А (хромель–алюмель), в расплав с помощью механизма перемещения опускается образец. После некоторой выдержки, необходимой для прогрева образца и ванны расплава до температуры испытания (в данном случае 700 °С), включается электропривод вращения образца. После испытания образца в течение определенного времени (5 мин) вращение образца прекращается и он извлекается из расплава. Далее такие циклы повторяются необходимое число раз.

Основным способом оценки износа образцов вследствие растворяемости материала при взаимодействии с расплавом является взвешивание образцов. Износ I в этом случае вычисляют по формуле

$$I = \sum_{i=1}^{n} \frac{\Delta m}{n S}, \qquad (1)$$

где m – потеря массы образца во время испытания, г;

n – число испытанных образцов;

S – площадь поверхности контакта образца с расплавом, см^2.

В случае, когда для всех испытанных образцов величина $n S$ постоянна, ей можно пренебречь и оценивать коррозионную стойкость (износ) по потере массы при испытаниях.

Для удаления остатков затвердевшего алюминиевого сплава с поверхности образцов после испытания их выдерживали в 75%-ном растворе NaOH. Время выдержки для образцов одинаково и составляет 1 ч. Образцы взвешивали с точностью до 0,001 г.

Для комплексной оценки факторов, оказывающих влияние на материал деталей пресс-форм ЛПД, соприкасающихся в процессе эксплуатации с алюминиевым расплавом, исследовали процессы физико-химического взаимодействия алюминиевого расплава с исследуемыми сталями.

В качестве алюминиевого расплава выбран эвтектический силумин АК12, обладающий повышенной жидкотекучестью.

Ключевым фактором при взаимодействии материала пресс-форм с жидким расплавом, заполняющим полость пресс-формы под давлением, является процесс растворения материала в расплаве.

Интенсивность процессов растворения в расплаве АК12 оценивали по износу образцов I, а также по изменению массы образца Δm в процессе термоциклирования в соответствии с формулой (1).

Для каждой плавки значения Δm вычисляли как среднее от измерений потери массы на трех образцах.

Исходя из размеров образца: диаметра d = 1,5 см и длины h = 15 см, определили площадь контакта поверхности образца с расплавом S = 7,07 см^2.

Исследования проводили на установке (см. рис. 1) по следующему режиму:

1. Окунание образца в алюминиевый расплав с температурой 700 °С.

2. Вращение образца в расплаве с частотой 200 мин$^{-1}$ в течение 5 мин.

3. Подъем образца из расплава.

Всего было проведено 1000 термоциклов. Характеристики износа измеряли через каждые 100 циклов.

Характер изменения параметров износа исследуемых сталей в течение 1000 термоциклов в алюминиевом расплаве представлен в табл. 2.

Математическая обработка результатов экспериментов позволила получить для каждой исследуемой группы плавок зависимость изменения износа от числа термоциклов N в логарифмической форме.

2. Характер изменения параметров износа при термоциклировании в алюминиевом расплаве

Номер плавки	Параметр износа	Число термоциклов N									
		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
1	$m_0 - m_1$, г	200...193	200...191	200...189	200...188	200...187	200...187	200...187	200...186	200...186	200...184
	Δm, г	7	9	11	12	13	13	13,7	14	15	16
	I, г/см^2	0,98	1,27	1,56	1,70	1,83	1,83	1,84	1,98	2,12	2,25
2	$m_0 - m_1$, г	196...189	196...187	196...185	196...184	196...183	196...183	196...183	196...182	196...182	196...180
	Δm, г	7	9	11	12	13	13	13,7	14	15	16
	I, г/см^2	0,98	1,27	1,56	1,70	1,83	1,83	1,84	1,98	2,12	2,25
3–6	$m_0 - m_1$, г	195...188	195...187	195...185	195...184	195...183	195...181	195...181	195...181	195...180	195...179
	Δm, г	7	8	10	11	12	14	14	14	15	16
	I, г/см^2	0,980	1,132	1,414	1,556	1,697	1,980	1,980	1,980	2,152	2,360
7–9	$m_0 - m_1$, г	196...189	196...188	196...186	196...185	196...184	196...184	196...183	196...183	196...182	196...181
	Δm, г	7	8	10	11	12	12	13	13	14	14
	I, г/см^2	0,950	1,132	1,414	1,556	1,560	1,697	1,690	1,838	1,980	2,122
10–13	$m_0 - m_1$, г	198...195	198...194	198...194	198...194	198...194	198...193	198...193	198...192	198...192	198...192
	Δm, г	3	4	4	4	5	5	6	6	7	7
	I, г/см^2	0,424	0,566	0,570	0,620	0,620	0,770	0,780	0,840	0,800	0,820
14–20	$m_0 - m_1$, г	198...195	198...194	198...194	198...194	198...194	198...193	198...193	198...192	198...192	198...192
	Δm, г	3	4	4	4	5	5	6	6	7	7
	I, г/см^2	0,424	0,566	0,570	0,620	0,620	0,770	0,780	0,840	0,800	0,820

Для сталей плавок № 1, 2 данные зависимости имеют вид

$$I = 0{,}51 \cdot \ln N - 1{,}38; \quad (2)$$

$$\Delta m = 3{,}7 \cdot \ln N - 10{,}32; \quad (3)$$

$r = 0{,}98$ – коэффициент парной корреляции.

Для сталей плавок № 3–6

$$I = 0{,}585 \cdot \ln N - 1{,}86; \quad (4)$$

$$\Delta m = 4{,}05 \cdot \ln N - 12{,}65; \quad (5)$$

$r = 0{,}97$.

Для сталей плавок № 7–9

$$I = 0{,}504 \cdot \ln N - 1{,}49; \quad (6)$$

$$\Delta m = 3{,}25 \cdot \ln N - 8{,}50; \quad (7)$$

$r = 0{,}98$.

Для сталей плавок № 10–20

$$I = 0{,}18 \cdot \ln N - 0{,}423; \quad (8)$$

$$\Delta m = 1{,}72 \cdot \ln N - 5{,}44; \quad (9)$$

$r = 0{,}95$.

Полученные зависимости изменения износа I и потери массы образцов Δm от числа термоциклов приведены на рис. 2

Анализ представленных результатов показал, что характер протекания процессов износа в сталях плавок № 1–9 примерно одинаков и они начинаются после 10...15 термоциклов. В сталях плавок № 10–20 (20Х10АЮФЛ) износ значительно ниже и начинается только после 25...30 термоциклов. Интенсивность износа образцов у сталей всех исследуемых групп плавок находится на достаточно низком уровне. Наибольший износ на уровне 2,263 г/см^2 зафиксирован в сталях плавок № 1, 2 после 1000 термоциклов. Это значительно ниже интенсивности износа основных штамповых сталей.

Известно, что интенсивность износа штамповых сталей 3Х2В8Ф, 4Х5МФС в указанном интервале термоциклирования минимум в 2–3 раза выше, чем у сталей плавок № 1, 2. Эти данные хорошо коррелируют с проведенными авторами статьи исследованиями.

Внешний вид образцов из сталей плавки № 18 (№ 1), плавки № 9 (№ 2), 20Х13Л (№ 3) и взятого для сравнения образца из штамповой стали 4Х5МФС (№ 4) после 1000 циклов в алюминиевом расплаве показан на рис. 3.

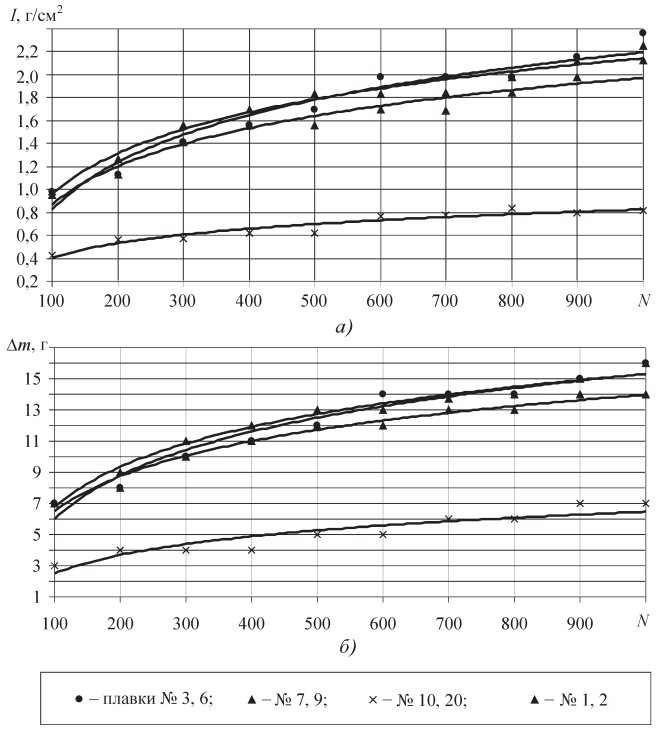


Рис. 2. Изменение износа *I* и массы Δ *m* от числа термоциклов *N* исследуемых сталей

Из рис. 3 видно, что процессы износа в штамповой стали 4Х5МФС протекают значительно интенсивнее, чем в исследуемых коррозионно-стойких сталях.

Интенсивность износа сталей плавок № 3–6, № 7–9 в сравнении со сталями плавок № 1, 2 несколько ниже, но порядок цифр в целом совпадает.

Существенно ниже зафиксирована интенсивность износа образцов у сталей плавок № 10–20 в сравнении с остальными исследованными группами плавок в течение всего интервала термоциклирования. После 1000 термоциклов в этих плавках износ составил 0,849 г/см^2.

Полученный результат значительно лучше характеристик износа, полученных на сталях плавок № 1, 2. Это связано с благоприятным воздействием алюминия на характеристики износа в сталях плавок № 10–20 в процессе интенсивного физико-химического взаимодействия с алюминиевым расплавом. Тонкие пассивирующие пленки оксидов алюминия, образующиеся на поверхности образцов из сталей плавок № 10–20, формируют дополнительные барьеры против коррозионного воздействия жидкого алюминиевого расплава, в значительной степени нейтрализуя его, за счет того, что алюминиевый расплав не имеет возможностей проникнуть сквозь алюминиевую пленку в материал детали пресс-формы или такие возможности существенно затруднены.

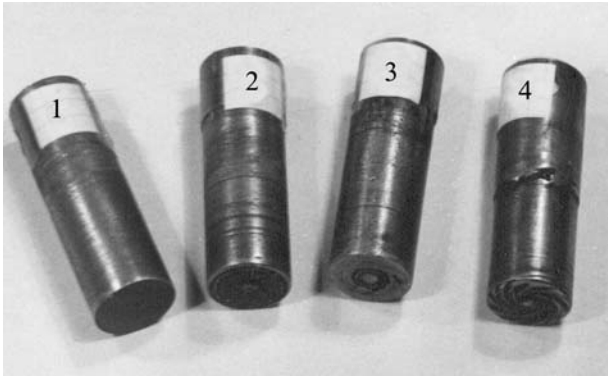


Рис. 3. Внешний вид образцов из различных сталей после 1000 термоциклов в алюминиевом расплаве

Приведенные данные дополнительно подтверждают правильность выбора алюминия в качестве одного из элементов легирующего комплекса коррозионно-стойкой стали 20Х10АЮФЛ для пресс-форм ЛПД алюминиевых сплавов.

Таким образом, исследования, проведенные с использованием разработанной в РГАТУ им. П.А. Соловьева оригинальной установки, позволили выявить закономерности протекания процессов физико-химического взаимодействия сталей для пресс-форм ЛПД с алюминиевым расплавом и сформулировать на их основе адекватные математические зависимости. Установлено, что коррозионная стойкость стали 20Х10АЮФЛ является наиболее высокой среди всех исследованных сталей, что в совокупности с другими важнейшими механическими и эксплуатационными свойствами позволяет ее использовать для изготовления наиболее ответственных деталей сталей для пресс-форм ЛПД алюминиевых сплавов взамен штамповых сталей.

Анатолий Алексеевич Жуков, канд. техн. наук;
Олег Вячеславович Немтырев, канд. техн. наук,
kamakina@mail.ru;
Лейла Александровна Хасанова, канд. техн. наук

УДК 621.762.01

С.А. Пахомова, В.В. Иванченко
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

Изготовление конструкционных деталей из металлических отходов

Показана экономическая эффективность и экологическая целесообразность использования промышленных металлических отходов (шлама) для изготовления конструктивных деталей вместо традиционной порошковой металлургии. Изучены способы подготовки шлама к изготовлению деталей, а также технологические схемы прессования и спекания из него деталей.

Ключевые слова: порошковая металлургия; металлические отходы; прессование; спекание.

Economic efficiency and ecological expediency of industrial metal junk (sludge) for the manufacture of structural parts instead of traditional powder metallurgy is shown. Ways to prepare of industrial metal junk to manufacture of parts, and also technological schemes of pressing and sintering of parts from it are studied.

Keywords: powder metallurgy; metal junk; pressing; sintering.

В настоящее время во многих странах для изготовления конструкционных и антифрикционных деталей широко применяют порошковую металлургию. Основными потребителями металлических порошков являются автомобильная промышленность, тракторное и сельскохозяйственное машиностроение.

Перспективность и актуальность такой технологии повышается благодаря возможности использования вместо промышленных порошков отходов производства в виде металлической стружки отходов штамповки и опилок (шлама) [1–3]. Установлено, что подобный материал перед применением необходимо подвергать специальной обработке, например: очистке стружки от смазочно-охлаждающей жидкости, газовой цементации или пропитке свинцом в среде водорода и т.д. Несмотря на экономическую целесообразность процесса переработки вторичного сырья, он до сих пор не получил достойного применения.

В данной работе изучены способы подготовки металлического шлама к изготовлению спеченных деталей, а также технологические схемы прессования и спекания из него деталей [4].

Комплексные исследования физико-механических свойств деталей из металлического шлама, а также сравнение этих свойств с аналогичными свойствами у деталей из литых сплавов и порошковых сталей включали в себя определение прочности, ударной вязкости, износостойкости и твердости. Установлено радиальное сжатие для определенного класса деталей и проведен контроль геометрических размеров и формы спеченных деталей и заготовок, а также качества их поверхности.

Объектами исследования служили образцы противорежущих пластин из стали 70Г и шлама этой стали после различных режимов прессования и спекания. Для обеспечения точности оценочных параметров и достоверности результатов испытуемые образцы соответствовали техническим требованиям по шероховатости рабочих поверхностей, наличию остаточной пористости и трещин.

Твердость спрессованных и спеченных деталей определяли по стандартной методике. Прочность, ударный изгиб и радиальное сжатие устанавливали по ГОСТ 2582, ГОСТ 26528 и ГОСТ 26529 соответственно.

Сравнительные испытания на износостойкость выполняли на образцах установленного размера (40×40 мм) на стенде КИШ86. Контроль геометрических размеров и формы осуществляли с помощью жесткого мерителя с точностью измерения до 0,01 мм и оптического микроскопа. Качество поверхности определяли методом сравнения с эталонными образцами.

Микроструктуру спеченных образцов, характер включений абразива, плотность его распределения, характер пористости, относительную пористость, структурную микронеоднородность, наличие других крупных включений изучали с помощью микроскопа МИМ-8 в светлом и темном поле.

Тонкую структуру, характер распределения микровключений, а также идентификацию этих включений, экстратированных с поверхности шлифов и изломов, осуществляли методом микродифракции на электронном микроскопе УЭМВ-100А. Рентгеноспектральный анализ выполняли на рентгеновском аппарате УРС-50. Цель химического анализа – определение общего содержания железа в металлическом шламе после магнитной сепарации и без нее.

В исходном состоянии металлический шлам имеет серый блестящий цвет и по гранулометрическому составу представляет собой мелкодисперсную механическую смесь опилок стали 70Г, абразива, бакелитовой связки и смазывающе-охлаждающей жидкости (СОЖ). Частички стали имеют иглообразную форму длиной 2...3 мм и диаметром 0,1...0,5 мм. Абразивные частицы достигают 40...60 мкм (после отсева на сите 0,1 мм их количество уменьшается с 25 до 6...8 %).

Весовой анализ шлама показал, что содержание СОЖ в шламе достигает 45...50 %. Причем СОЖ существенно предохраняет шлам от окисления, так как при его отсутствии он окисляется в течение 1,5...2 сут. (в 2 раза быстрее). Такой шлам не обладает текучестью, что затрудняет его засыпку в пресс-форму.

Подготовка шлама к изготовлению спеченных деталей заключалась в удалении жидкости из шлама, протирке и сушке металлического шлама в целях получения сыпучего материала, в последствии используемого для засыпки пресс-форм.

Исследования показали, что для получения чистого неокисленного, сухого шлама необходимо перед сушкой удалить из него жидкость. Предельное содержание жидкости в шламе должно составлять не более 8...10 %, иначе в процессе просушки он активно окисляется. Установлено, что СОЖ из шлама целесообразно удалять в несколько приемов, используя центрифугу с частотой вращения 800...1000 мин$^{-1}$ в течение 0,5...0,6 ч.

В процессе механического удаления жидкости путем центрифугирования шлам сбивается в комки (подобно войлоку). Поэтому перед операцией сушки его необходимо протереть через специальные протирочные сита отверстием 2...3 мм. При этом шлам одновременно разрыхляется и подготовляется для последующей сушки.

Простым и наиболее эффективным является способ просушки шлама в слоях толщиной до 8 мм при плотности слоев 0,8...0,9 г/см^3 на открытом воздухе при комнатной температуре 18...25 °С. Увеличение температуры до 35 °С и выше сопровождается активным окислением шлама. Так, при 40 °С последний окисляется на 25...30 %, а при 80 °С – почти полностью. Снижение температуры сушки до 10...15 °С замедляет окисление, однако значительно снижает производительность процесса, так как скорость сушки уменьшается в 3–4 раза по сравнению с сушкой на воздухе.

Прессование деталей и образцов осуществляли на механическом пресс-автомате КА8134 силой 2,5 МН. Для деталей с остаточной пористостью 25...30 % может быть применена схема одностороннего и двухстороннего однократного прессования с давлением 450...550 МПа. Увеличения плотности заготовок из металлического шлама можно добиться путем двухкратного холодного прессования предварительно спеченной заготовки или динамического горячего прессования. При выборе схемы прессования в каждом конкретном случае необходимо исходить из особенностей деталей.

Спекание осуществляли в камерной печи периодического действия СНЗ-5.10.5/12 в среде угольного карбюризатора (способом засыпки) при температуре 1100...1150 °С. В этой печи проводили также термическую обработку спеченных деталей. Получили, что наряду с газовой средой (диссоциированном аммиаком) спекание можно проводить способом засыпки, используя для этого угольный карбюризатор. Последний вариант более предпочтителен, если деталь будет подвергнута цементации и закалке.

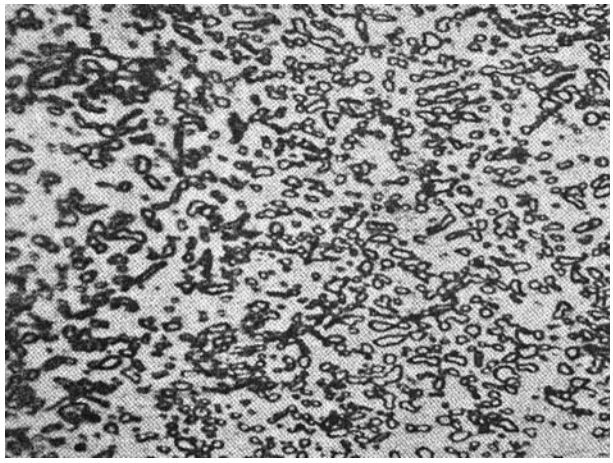


Рис. 1. Микроструктура зернистого перлита в материале, изготовленном методом динамического горячего прессования. ×240

По результатам металлографических исследований компонентный состав прессованного шламового материала следующий: основа – сталь 70Г; 6...8 % – абразив SiO_2. СОЖ практически отсутствует, так как ее остатки, не удаленные механическими способами, выгорают во время спекания. Спекание в угольном карбюризаторе приводит к насыщению поверхности углеродом до 1,0...1,5 % и формированию структуры, схожей на структуру заэвтектоидной стали, подверженной рекристаллизационному отжигу, а именно: зернистого и частично пластинчатого перлита или смеси последнего с цементитом (рис. 1).

Наличие цементита и абразивных включений размером 0,3...0,6 мм значительно увеличивают износостойкость материала (рис. 2).

Наличие мелких и крупных пор в материале позволяет применять материал в качестве антифрикционного, так как поры способствуют эффективной пропитке поверхностного слоя смазывающими веществами (машинное масло, фторопласт и др.). Таким образом, при одновременном снижении коэффициента трения между двумя трущимися деталями, изготовленными по данной технологии, износостойкость деталей не снижается, что выгодно отличает этот материал от многих других.

При спекании шлама стали 70Г в среде угольного карбюризатора происходит интенсивное насыщение деталей углеродом, что существенно меняет компонентный состав материала.

В процессе выгорания моторного масла, вносимого в шихту в качестве смазки, также происходит обогащение материала углеродом. Пористость способствует проникновению углерода на большую глубину, чем в компактных аналогах. На компонентный состав так-

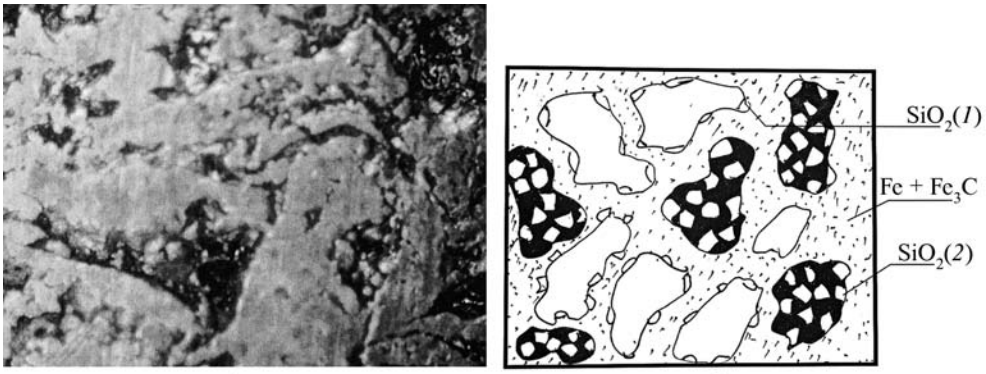


Рис. 2. Микроструктура (*а*) и схема (*б*) расположения включений абразива (*1* – в ферритной основе и *2* – в порах) на поверхности шламового материала из стали 70Г. ×40

же влияют осадок от выпариваемой СОЖ, наличие абразива и бекелитовой смолы.

В табл. 1 приведены данные по химическому составу противорежущих пластин, изготовленных при давлении прессования 650 и 750 МПа с остаточной пористостью 25...30 и 12...15 % соответственно.

Распределение углерода, марганца, кремния и хрома может существенно меняться по глубине спекаемых деталей с увеличением плотности материала. В более плотных образцах происходит меньшее выгорание углерода в середине деталей при уменьшении глубины насыщенности до 0,8...1,0 мм. Характер выгорания марганца и кремния с повышением плотности материала не изменяется, а хрома – изменяется. Последний на поверхности выгорает больше.

Пористость спеченного материала занимает особое место в определении его эксплуатационных характеристик. От пористости напрямую зависят свойства и назначение материала. В зависимости от пористости материал может быть использован для изготовления фильтров, фрикционных накладок, режущих пластин аппаратов косилок и комбайнов и т.д.

Исследование зависимости пористости шламового материала от давления (рис. 3) показало асимптотический характер ее изменения, так как при любом значении силы прессования достижение структуры литого материала невозможно по целому ряду причин, среди которых: наличие воздуха в порах, остатков СОЖ и примесей. Противоположный характер имеет зависимость твердости от давления прессовании (рис. 4), которая увеличивается с ростом давления тоже асимптотически, приближаясь к твердости литого материала.

Твердость спеченных шламовых материалов напрямую зависит от давления и схемы прессования, а также от температуры спекания и остаточной пористости (табл. 2). Максимальной твердостью обладает материал, полученный методом *динамического горячего прессования* (ДГП). Меняя давление прессования и схему прессования, можно получать спеченные шламовые материалы с широким диапазоном пористости и твердости.

Изучение твердости компактных и спеченных материалов позволяет оценить их эксплуатационные характеристики, особенно износостойкость.

Результаты испытаний износостойкости режущих пластин приведены в табл. 3. Видно, что износостойкость шламового спеченного материала примерно в 2 раза выше чем у литой стали 70Г.

1. Распределение химических элементов по глубине спеченного шламового материала из стали 70Г в противорежущей пластине

Однократное прессование	Давление прессования, МПа	Толщина образца, мм	Содержание, %			
			C	Mn	Cr	Si
Одностороннее	6,50	1,0	0,75	0,45	0,87	0,33
		2,0	0,73	0,48	0,70	0,32
		3,0	0,70	0,46	0,76	0,30
		4,0	0,71	0,45	0,70	0,33
Двухстороннее	7,50	1,0	0,81	0,83	0,18	1,2
		2,0	0,84	0,86	0,20	1,1
		3,0	0,64	0,93	0,22	1,1
		4,0	0,43	1,00	0,26	1,2
		4,0	0,43	1,00	0,26	1,2

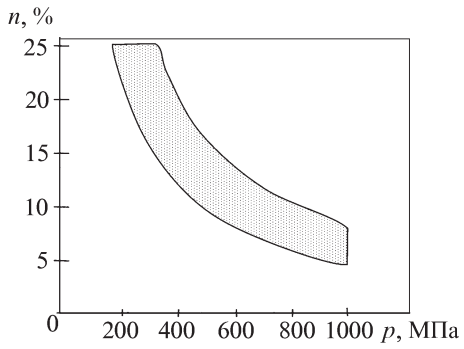


Рис. 3. Зависимость пористости *n* шламового материала из стали 70Г от давления прессования *p*

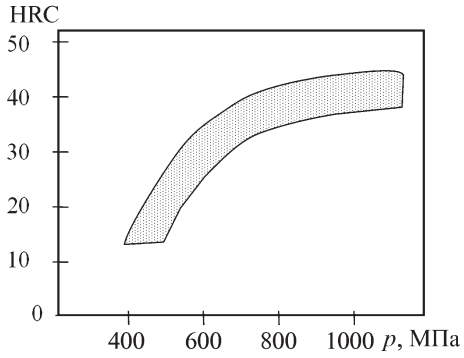


Рис. 4. Зависимость твердости HRC шламового материала из стали 70Г от давления прессования *p*

2. Зависимость твердости шламовых материалов от остаточной пористости

Прессование	Спекание	Давление прессования, МПа	Температура прессования, °С	Температура спекания, °С	Остаточная пористость, %	Среднее значение твердости, HRC
Двухкратное, одностороннее	Двойное (ДГП)	750...800 750...800	900...950	1100 900	3...4	32,5
Однократное, двухстороннее	Однократное	750...800	18...20	1100	15...20	17,0
Двухкратное, одностороннее		750...800 650...700			6...8	27,7
Однократное, одностороннее		750...800			7...10	26,0
		750...800			10...15	21,6
		750...800				22,5
		750...800				22,7
Двухкратное, одностороннее	Двухкратное	750...800 650...750			6...8	24,8
Однократное, одностороннее	Однократное	750...800			10...15	22,3
		750...800				21,6
		450...550			25...30	14,3

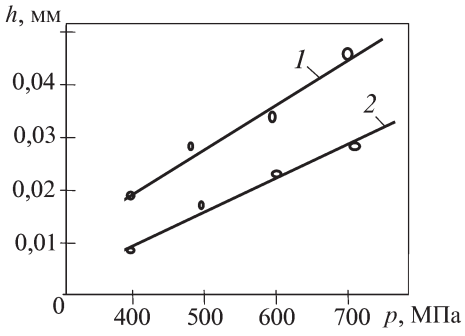


Рис. 5. Зависимость износа пресс-форм *h* от давления прессования *p:*
1 – шлам (сталь 70Г); *2* – сталь 70Г

Износостойкость пресс-форм определяется прежде всего составом прессуемой шихты, режимом прессования и силой (давлением) прессования, что зависит от номенклатуры прессуемых заготовок. При этом

3. Износостойкость режущих пластин из стали 70Г

Материал	Номинальная сила трения, Н	Число циклов	Износ, $м^3$
Сталь 70Г	10	6500	0,025...0,027
Шлам (сталь 70Г)			0,01

износ пресс-форм существенно снижается при введении в шихту дополнительно твердой смазки в виде графита (рис. 5).

Прочность спеченного шламового материала из стали 70Г составляет 65...80 % прочности литой стали 70Г. Такой уровень прочности является удовлетворительным для конструкционных малонагруженных деталей.

Выводы

1. Прочность спеченного шламового материала из стали 70Г составляет 65...80 % прочности литой стали 70Г.

2. Износостойкость шламового спеченного материала примерно в 2 раза выше чем у литой стали 70Г.

3. Исследуемый материал в зависимости от его остаточной пористости, твердости и износостойкости можно использовать в качестве конструкционного или фрикционного материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Либенсон Г.А., Лопатин В.Ю., Комарницкий Г.В.** Процессы порошковой металлургии: учебник для вузов. М.: МИСИС, 2001. 318 с.

2. **Кофтелев В.Т.** Порошковая металлургия ОАО "АвтоВАЗ" и России // Кузнечно-штамповое производство. Обработка материалов давлением. 2006. № 1. С. 16–22.

3. **Тарасенко Л.В., Пахомова С.А., Унчикова М.В.** Материаловедение. М.: ИНФРА-М, 2012. 475 с.

4. **Пахомова С.А., Иванченко В.В.** Эффективность использования металлических отходов для изготовления конструкционных деталей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2007. № 3. С. 74–78.

Светлана Альбертовна Пахомова, канд. техн. наук,
pahom_sv@mail.ru;
Виктор Владимирович Иванченко

Поздравляем

Анатолия Алексеевича Жукова, канд. техн. наук, профессора *с 75-летием!*

Анатолий Алексеевич Жуков родился 1 апреля 1939 г.

В 1963 г. он окончил Рыбинский вечерний авиационный технологический институт по специальности "Машины и технология литейного производства". Одновременно с учебой в вечернем институте с 1957 по 1963 г. работал в литейном цехе Рыбинского моторостроительного завода (ныне ОАО НПО "САТУРН") бригадиром, технологом, конструктором.

С 1963 г. Анатолий Алексеевич работает в Рыбинском государственном авиационном техническом университете. Основные этапы его научно-педагогической деятельности: 1963–1965 гг. – ассистент; 1965–1975 гг. – старший преподаватель; 1976–1991 гг. – доцент; в 1991 г. ему присвоено звание профессора. В 1974 г. успешно защитил кандидатскую диссертацию по специальности "Металловедение и термическая обработка". В период с 1976 по 1980 г. – декан авиаметаллургического факультета, с 1989 по 1990 г. – и.о. проректора по НИР РГАТА. С 1990 по 2008 г. – заведующий кафедрой "Материаловедение, литье, сварка" (МЛС), в настоящее время является профессором этой кафедры.

При непосредственном участии А.А. Жукова на кафедре МЛС с 1993 г. организована подготовка инженеров по специальностям "Металлургия сварочного производства", "Материаловедение и технология новых материалов", а также двухуровневая подготовка (бакалавров и магистров) по материаловедению.

Основное направление научных исследований А.А. Жукова – повышение качества материалов и изделий в условиях термоциклических воздействий с использованием физических методов неразрушающего контроля и статистического анализа. По результатам НИР А.А. Жуковым в соавторстве опубликовано в центральных журналах более 150 статей, 4 монографии, получено 12 авторских свидетельств и патентов, он является автором 7 учебных пособий.

Под руководством А.А. Жукова подготовлены и защищены 9 кандидатских диссертаций. Результатом внедрения НИР в учебный процесс является создание на кафедре учебно-исследовательской лаборатории "Контроль качества материалов и заготовок", оснащенной современными средствами неразрушающего контроля. Анатолий Алексеевич возглавляет областное региональное отделение Ассоциации литейщиков России, является членом проблемного Совета Верхне-Волжского отделения Академии технологических наук РФ, членом-корреспондентом Академии проблем качества, а также членом Российского общества неразрушающего контроля и технической диагностики (РОНКТД). С 1997 г. А.А. Жуков входит в состав редакционного совета журнала "Справочник. Инженерный журнал".

А.А. Жуков дважды награжден знаком "Победитель соцсоревнования" 1974 и 1976 гг., в 1980 г. он награжден знаком Министерства высшего и среднего образования СССР "За отличные успехи в работе", в 1987 г. – медалью "Ветеран труда", в 1999 г. – нагрудным знаком "Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации", а в 2003 г. награжден почетным знаком губернатора Ярославской области "За заслуги в науке".

Коллектив редакции и редакционный совет журнала желают Анатолию Алексеевичу крепкого здоровья, благополучия, новых профессиональных достижений на благо России!

УДК 621.961.2

Е.И. Лыжников, Е.К. Давыденко
(Московский государственный технический университет "Станкин")

Технологический процесс и параметры плоского ножа при резке труб

Проанализированы результаты экспериментальных исследований резки труб плоским ножом, определены силовые параметры резки, рассмотрено влияние конфигурации ножа на процесс образования стружки-отхода и отделение заготовки по ходу ножа.

Ключевые слова: штамп; труба; резка; плоский нож; стружка-отход.

The results of experimental studies of cutting pipes with flat knife are analyzed, cutting force parameters are defined, the influence of the knife configuration on process of chip-to-waste formation and separation of workpiece along the knife is considered.

Keywords: stamp; pipe; cutting; flat knife; chip-to-waste.

Резка труб плоским ножом может иметь широкое технологическое применение, что объясняется простой схемой резки, хорошим качеством отрезанных заготовок, высокой производительностью. Однако такой технологический процесс не нашел широкого применения в промышленности. Основной причиной этого является недостаточная изученность процесса резки трубы плоским ножом.

Как указывалось в первых литературных источниках, для резки использовался нож с заостренной нижней частью. Этой зоной нож выполнял прорезку трубы, что приводило к искажению профиля заготовки. Для устранения этого дефекта приходилось усложнять конструкцию штампа (см. кн. Нефедов А.П. Конструирование и изготовление штампов. М.: Машиностроение, 1973. 408 с.).

Для устранения указанного дефекта была предложена схема резки с предварительным прорезом паза в верхнем сечении трубы, что исключало применение ножа с заостренной зоной (см. кн. Мещерин В.Г. Атлас схем. Листовая штамповка. М.: Машиностроение, 1975. 227 с.).

В дальнейших литературных источниках измененные технологии резки труб не описывались, а воспроизводились результаты исследований предыдущих авторов [1].

Фактор плоского ножа для резки труб требует детального изучения. Стружка-отход отгибается ножом внутрь трубы. Вследствие трения по режущей кромке ножа происходит утолщение стружки при внедрении ножа в трубу (рис. 1).

Некоторое смещение оси ножа относительно оси трубы выполнено для того, чтобы при одном движении ножа иметь различное внедрение последнего в трубу, т.е. разную картину образования стружки-отхода. При резке в нижней зоне сечения трубы стружка-отход смещается наружу (рис. 2).

Переменное смещение стружки при перемещении ножа относительно трубы можно объяснить действием составляющей силы резки трубы (рис. 3).

В верхней зоне трубы составляющая силы резания F_c – сила смещения стружки направлена внутрь сечения. Сила F_c обеспечивает изгиб стружки относительно режущей плоскости ножа, а также трение наружной поверхности стружки о нож. В нижней зоне сечения трубы стружка меняет свое направление смещения [2].

Такая картина смещения стружки ножом подтверждается блестящим пояском и зоной хрупкого разрушения на торцевых поверхностях отрезанной заготовки и трубы (рис. 4).

Рис. 1. Промежуточное положение ножа при отрезке трубы

Рис. 2. Отделение стружки-отхода при промежуточном положении ножа

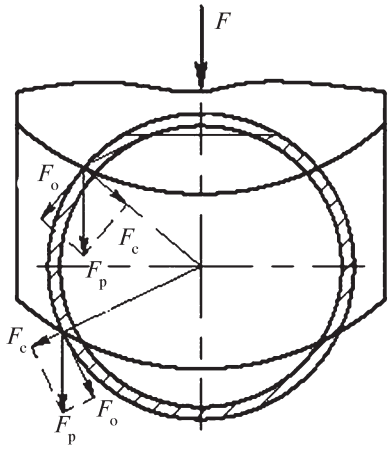


Рис. 3. Смещение стружки при перемещении ножа относительно трубы

В верхней зоне трубы блестящий поясок размещается на наружной кромке сечения, а в нижней зоне – на внутренней. В диапазоне угла ≈10...15° происходит

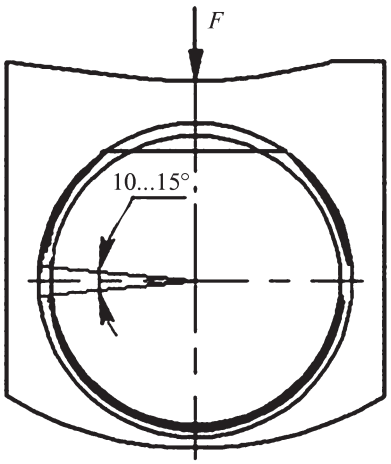


Рис. 4. Изменение зон пластического деформирования по ходу ножа

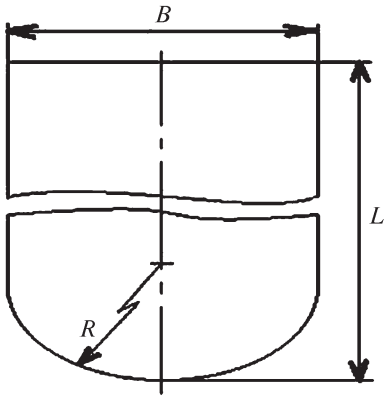


Рис. 5. Параметры ножа

переход блестящего пояска с наружной во внутреннюю поверхность сечения отрезанной заготовки.

Исходя из принятой технологии предварительной прорезки паза, требования к профилю ножа изменяются. Ход ножа должен быть соизмерим с диаметром трубы, сила отрезки должна быть минимально возможной и возрастать незначительно, профиль ножа должен обеспечивать последовательное отделение заготовки от трубы.

За основу оценки изменения силы резки трубы принят плоский нож с параметрами, указанными на рис. 5.

Длина ножа L определяется габаритными размерами штампа. Ширина ножа B выбирается из условия свободного выпадения стружки из штампа в момент отрезки заготовки от трубы. Односторонний зазор должен быть более двух толщин стенки S разделяемой трубы $(2,5...3,0)S$. Такой зазор объясняется тем, что при ходе ножа $\approx 0,7d_н$ трубы внутренняя стружка схватывается с наружной, образуя единую стружку увеличенной толщины (рис. 6).

Радиус кривизны режущей поверхности ножа R рекомендуется выбирать из условия постоянного отделения заготовки от трубы по ходу ножа, т.е. $R = (1,3...1,5)d_н$. При выборе $R \le d_н$ в конце хода нож начинает прорезать трубу в зоне вертикальной оси с

Рис. 6. Соединение внутренней стружки с наружной

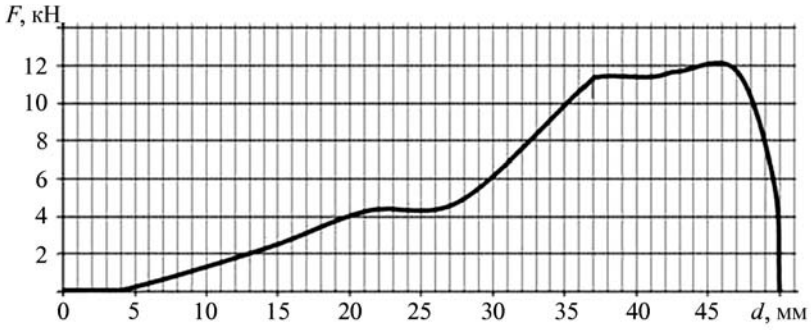


Рис. 7. График силы резки трубы

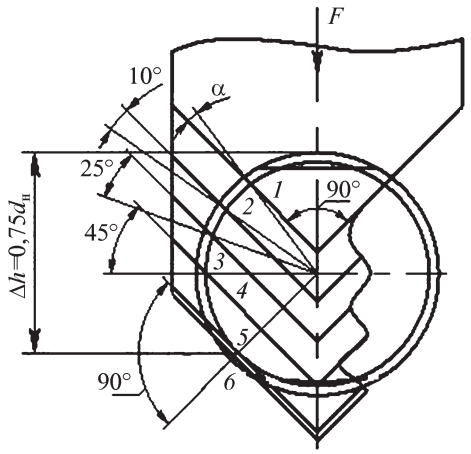


Рис. 8. Схема последовательного внедрения ножа в трубу

образованием перемычки с неотрезанной еще зоной. При $R > 1{,}5\ d_н$ значительно увеличивается сечение отрезки отделяемой заготовки в конце хода ножа, что сказывается на силе.

Толщину ножа выбирают с учетом материала, толщины стенки трубы и осевой устойчивости ножа. В экспериментах по резке труб из алюминия и стали с толщиной стенки 2...3 мм использовали нож толщиной 2 мм.

Для оценки изменения силы резки трубы из алюминиевого сплава АК7 диаметром $d_н = 50$ мм, толщиной стенки $S = 2$ мм процесс был записан на разрывной машине (рис. 7).

Согласно графику (см. рис. 7), сила резки трубы по ходу ножа постоянно возрастает. Это объясняется увеличением контактной линии сечения трубы с режущей поверхностью ножа. На рис. 8 показана схема последовательного внедрения ножа в трубу. Для упрощения оценки изменения контактной линии был взят нож с линейной режущей кромкой.

При относительном ходе ножа $\approx 0{,}75\ d_н$ длина контактной линии возросла в ~3 раза (т. *1–5*). В т. *6* контактная линия увеличивается практически в 2 раза относительно т. 5. Это зафиксировано на кривой силы резки в момент полной отрезки заготовки.

Рассмотрим влияние выемки радиусом $r_в$ в ноже на силу резки в конечный момент отделения заготовки (рис. 9).

Выделим три точки перемещения ножа – *1*, *2*, *3*. Шаг перемещения 2 мм. В т. *1* сила резки незначительна. В т. *2* площадь отделяемого металла заготовки возрастает. В т. *3* сила максимальна.

Для снижения силы резки в конечной точке хода ножа предлагается в ноже выполнить выемку. Выбор профиля выемки определяется необходимостью уменьшения силы отрезки заготовки. Размеры выемки представлены на рис. 9.

Точки хода ножа *1′*, *2′*, *3′* соответствуют резке трубы профилем выемки. Отделяемое сечение трубы точек *1′*, *2′*, *3′* соизмеримо с сечением в начальный момент отрезки трубы. Величина этой силы незначительна, что подтверждается кривой силы резки трубы ножом с указанной выше выемкой (рис. 10).

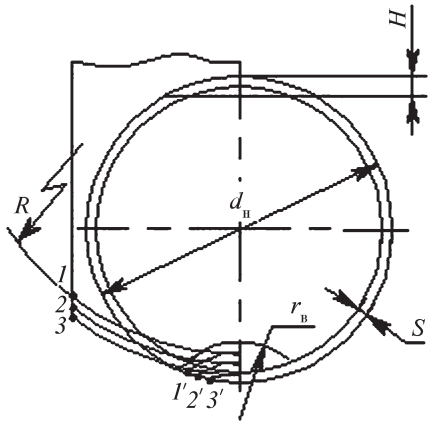


Рис. 9. Процесс резки трубы в момент полного отделения заготовки:
$d_н = 50$ мм; $S = 2$ мм; $H = (2{,}0...2{,}5)S$; $r_в = (0{,}25...0{,}30)d_н$; $R = 70$ мм

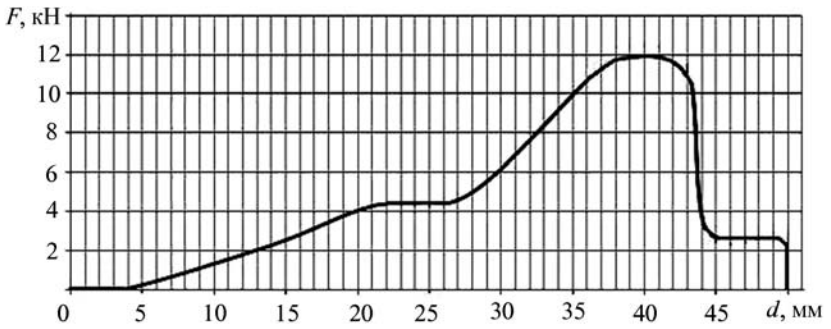


Рис. 10. График силы резки трубы ножом с выемкой

Рис. 11. Стружка-отход при резке трубы ножом с выемкой

Постоянная сила резки ≈2,5 кН действует на участке хода ножа ≈4,5...5,0 мм. Конфигурация стружки отхода полностью соответствует профилю ножа (рис. 11).

Толщина стружки в зоне выемки ножа постоянна и соответствует толщине стенки трубы, что позволило определить сопротивление срезу $\tau_{ср} = 150$ МПа. Изменилась и картина блестящего пояска, которая отражает уменьшение силы резания при отделении заготовки от трубы усложненным профилем ножа (рис. 12).

Экспериментальные исследования резки труб плоским ножом показали перспективность данного процесса, выявили последовательность образования стружки-отхода и изменение силы резания по ходу ножа, а также влияние профиля ножа на процесс отрезки заготовки от трубы.

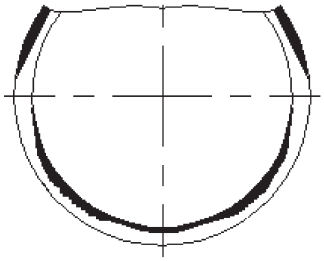


Рис. 12. Зона блестящего пояска при резке ножом с выемкой

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Попов Е.А., Ковалев В.Г., Шубин И.Н.** Технология и автоматизация листовой штамповки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 480 с.

2. **Лыжников Е.И., Дунда Е.К.** Технологические и силовые параметры резки труб плоским ножом // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2013. № 1.

Евгений Иванович Лыжников, канд. техн. наук;
Елена Константиновна Давыденко,
dunda.elena@mail.ru

ООО "Издательство Машиностроение"
продолжает подписку на журнал

«ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ»

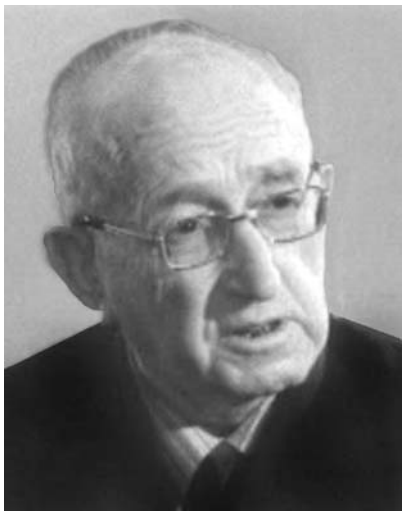
- За наличный и безналичный расчет
- С любого номера и на любой срок
- Без почтовых наценок

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

А.Г. Колесников
(Московский государственный университет им. Н.Э. Баумана)

К 110-летию академика АЛЕКСАНДРА ИВАНОВИЧА ЦЕЛИКОВА



Академик А.И. Целиков – *выдающийся ученый XX в., создатель современной теории прокатки и знаменитый конструктор металлургического оборудования – основал в МГТУ им. Н.Э. Баумана кафедру прокатки и бессменно руководил ею 35 лет.*

Александр Иванович родился 20 апреля 1904 г. в Москве. В 1921 г. он закончил обучение в 1-й Российской гимназии совместного обучения в подмосковном поселке Малаховка и поступил на Механический факультет Московского высшего технического училища (МВТУ), которое окончил в 1928 г.

В 1935 г. А.И. Целиков поступил доцентом в МВТУ на кафедру "Прокатка и волочение". За его плечами был семилетний (1925–1932 гг.), начиная со студенческой скамьи, опыт конструкторской работы в "Стальпроекте", восьмимесячная стажировка в 1930 г. в Германии на заводах Круппа, работа с 1932 по 1934 г. на Ижевском металлургическом заводе.

В МВТУ он активно участвует в составе инициативной группы в работе по развитию лабораторной базы для научных исследований и учебного процесса. Результатом деятельности этой группы было решение правительства о строительстве для МВТУ им. Н.Э. Баумана "Научно-исследовательской лаборатории прокатки и прокатного машиностроения". К тому времени в Московском механико-машиностроительном институте им. Н.Э. Баумана (так назывался тогда МВТУ) на экспериментальной установке были уже получены первые образцы стальной полосы способом бесслитковой прокатки.

В июле 1938 г. А.И. Целиков назначен на должность заведующего кафедрой "Прокатка и волочение", в этом же году выходит в свет его фундаментальный учебник "Расчет и конструирование прокатных машин-орудий".

К сожалению, не суждено было сбыться планам по развитию в МВТУ им. Н.Э. Баумана научно-исследовательской лаборатории прокатки и прокатного машиностроения. В конце 1938 г. МВТУ было передано в систему Наркомата оборонной промышленности (НКОП), а кафедра прокатки – в Московский институт стали.

С 1938 по август 1940 г. А.И. Целиков работает доцентом в Московском институте стали, а затем его назначают заведующим кафедрой "Механическое оборудование металлургических цехов" Московского вечернего металлургического института (МВМИ), где он проработал до мая 1945 г.

Работая в этом институте, Александр Иванович успешно защищает докторскую диссертацию в 1943 г. и становится профессором. В том же году он поступает на работу по совместительству в Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения (ЦНИИТмаш). В дальнейшем решением правительства по инициативе А.И. Целикова и под его руководством организуется в 1945 г. Центральное конструкторское бюро металлургического машиностроения (ЦКБММ) с исследовательскими лабораториями при ЦНИИТмаше.

За период работы в Московском вечернем металлургическом институте А.И. Целиковым были написаны книги "Прокатные станы" и "Механизмы прокатных станов". Эти работы создавались в тяжелые военные годы (1941–1942 гг.), многие фрагменты были написаны в бомбоубежищах. Обе эти книги вышли в свет уже в 1946 г.

В 1947 г. за высокий уровень этих трудов и их громадное значение для науки и промышленности страны А.И. Целикову была присуждена первая Государственная премия СССР. В 1948 г. за разработку нового эффективного способа получения полос и фасонных профилей переменного по длине сечения А.И. Целикову была присуждена вторая Государственная премия СССР.

В 1949 г. Александр Иванович Целиков добивается специального постановления Правительства для открытия на Механико-технологическом факультете МВТУ им. Н.Э. Баумана кафедры "Машины и технологии прокатки и волочения". Он возглавил кафедру и руководил ею бессменно 35 лет, был безусловным лидером процесса становления и развития научных исследований на кафедре прокатки в МВТУ.

Его идея объединения науки, производства и образования в единое целое особенно актуальна в нынешнее время преобразований. Он видел в фигуре инженера творца, созидателя нового в той области, для которой его подготовили в вузе. А.И. Целиков считал, что главным условием качественной подготовки специалистов является обучение на базе научных достижений, полученных в ходе как собственных исследований в вузе, так и достижений научных организаций, подчеркивая, что ни в коем случае нельзя отрываться от реального производства.

Первые преподаватели, которых А.И. Целиков пригласил для работы в МВТУ, начали развивать научные направления на кафедре. Это были М.Л. Зарощинский, В.В. Смирнов, Б.С. Азаренко.

Профессор М.Л. Зарощинский заложил в МВТУ научное направление, связанное с развитием теории прокатки и методов расчета процесса реверсивной прокатки. Им написаны учебник для втузов "Прокатка стали" и монография "Прокатные станы".

Доцент В.В. Смирнов развивал исследования в области теории процессов пластического деформирования полосы при правке и несимметричной прокатке. Он автор классических опытов о влиянии внешних зон на энергосиловые параметры прокатки, совместно с А.И. Целиковым им были переработаны и переизданы книги "Прокатные станы" и "Механизмы прокатных станов".

Профессор Б.С. Азаренко разрабатывал на кафедре направление, связанное с трубным производством. Особенно плодотворны были работы его группы по разработке новых конструкций трубопрокатных и трубоволочильных станов.

С 1951 г. начался прием на первый курс на кафедру прокатки. В дальнейшем формируется штат кафедры из числа выпускников. На постоянной основе стали преподавать В.А. Жаворонков, В.М. Лушников, Г.С. Никитин, Ю.И. Синельников, Ю.П. Шинкаревич, Н.И. Матурин.

К началу 70-х годов XX в. под руководством А.И. Целикова в МВТУ им. Н.Э. Баумана по существу сложилась научная школа в области конструирования металлургических машин, теории и технологии непрерывных процессов обработки давлением. В это время зарождаются новые и успешно развиваются прежние направления научной деятельности кафедры, результаты которых отмечены на государственном уровне.

В 1982 г. кандидат технических наук, доцент кафедры О.В. Соколова стала лауреатом премии Ленинского Комсомола в области науки и техники за участие в создании технологии и оборудования производства труб для авиационной промышленности и атомной энергетики.

В 1984 г. за участие в работах по созданию деталепрокатных станов доктору технических наук, профессору В.А. Жаворонкову присвоено звание лауреата Государственной премии СССР в области науки и техники.

Творческая атмосфера на кафедре и постоянное научное сотрудничество с ВНИИМЕТМАШем способствовали успехам научной школы, созданной академиком А.И. Целиковым в МВТУ им. Н.Э. Баумана. С 1963 по 1984 г. сотрудниками и аспирантами кафедры были защищены 45 диссертаций, из них 3 докторские (В.А. Жаворонков, Б.С. Азаренко, Г.С. Никитин).

28 октября 1984 г. Александр Иванович Целиков скончался.

Неоценим его вклад в науку, образование и в техническую мощь Родины: 36 монографий и учебников, свыше 500 статей, 226 изобретений, по его проектам созданы опережающие время машины и агрегаты, новые технологии, работают металлургические заводы.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана заслуги академика А.И. Целикова общепризнанны, его портреты находятся в галерее выдающихся выпускников, в галерее основателей научных школ университета, в университетском музее, его бюст украшает вход в главное здание университета на Яузе.

В дальнейшем кафедра продолжала развивать научные направления, инициированные А.И. Целиковым. Работа проводилась в тесном сотрудничестве с коллективом ВНИИМЕТМАШа, другими научными организациями и заводами. Большой вклад внесли соратники и ученики А.И. Целикова, руководившие кафедрой после его кончины.

Академик Александр Иванович Целиков оставил свой завет всем поколениям ученых – *главным условием технического прогресса является единство науки, образования и производства*.

А.И. Целиков – *дважды Герой Социалистического Труда, награжден двумя орденами Ленина, орденом Октябрьской Революции, двумя орденами Трудового Красного Знамени, орденом Дружбы народов. Он лауреат Ленинской премии, трижды лауреат Государственной премии, награжден высшей наградой Академии наук СССР – Золотой медалью им. М.В. Ломоносова.*

Александр Григорьевич Колесников,
д-р техн. наук, nukmt@mx.bmstu.ru

Российская Академия Наук

Президиум Российской академии наук своим решением № 275 от 17 декабря 2013 г. постановил:

"Присудить премию имени И.П. Бардина 2013 года *доктору физико-математических наук* **Виктору Евгеньевичу Громову** (ФГБОУ ВПО "Сибирский государственный индустриальный университет"), *кандидату технических наук* **Валерию Яковлевичу Чинокалову** и *доктору технических наук* **Алексею Борисовичу Юрьеву** (ОАО "ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат") за работу "Разработка и внедрение ресурсосберегающих технологий упрочнения проката и прокатных валков, обеспечивающих получение высокого уровня прочности и эксплуатационной стойкости".

Коллектив редакции и редакционный совет журнала сердечно поздравляют члена редакционного совета В.Е. Громова и авторов В.Я. Чинокалова и А.Б. Юрьева с заслуженной наградой и желают дальнейших творческих успехов!

ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромынский пер., 4
Учредитель ООО "Издательство Машиностроение". **E-mail: zpm@mashin.ru**
Телефоны редакции журнала: (499) 268-47-19, 268-36-54, 268-69-19. **http://www.mashin.ru**
Дизайнер *Поджиботов К.Ю.* Технический редактор *Жиркина С.А.* Корректоры *Сажина Л.И., Сонюшкина Л.Е.*
Сдано в набор 11.02.2014 г. Подписано в печать 27.03.2014 г. Формат 60×88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство Машиностроение".
Отпечатано в ООО "Белый ветер". 115407, Москва, Нагатинская наб., д. 54, пом. 4.

Поздравляем

Владимира Денисовича Кухаря,

д-ра техн. наук, профессора

с 65-летием!

16 апреля 2014 г. исполнилось 65 лет проректору по научной работе, заведующему кафедрой "Теоретическая механика" Тульского государственного университета (ТулГУ), заслуженному работнику высшего образования РФ, доктору технических наук, профессору Владимиру Денисовичу Кухарю.

В.Д. Кухарь в 1972 г. окончил с отличием Тульский политехнический институт, в 1975 г. досрочно закончил аспирантуру, защитив кандидатскую диссертацию с присуждением ему ученой степени кандидата физико-математических наук. С 1972 г. и до настоящего времени Владимир Денисович работает в ТулГУ, пройдя трудовой путь от ассистента до проректора и заведующего кафедрой.

В 1981 г. В.Д. Кухарю с коллективом авторов присуждена премия Ленинского комсомола "За комплекс разработок по интенсификации процессов формообразования листовых, трубчатых и объемных заготовок". По результатам этих работ была издана монография "Прогрессивные технологические процессы холодной штамповки", отмеченная премией Минвуза СССР в 1986 г.

В 1989 г. В.Д. Кухарь защитил докторскую диссертацию. В 1991 г. он награжден премией имени С.И. Мосина, в 1992 г. утвержден профессором.

В 1995 г. Владимир Денисович назначен заведующим кафедрой "Теоретическая механика" ТулГУ. При его участии изданы 18 учебных пособий, проведена работа по созданию учебно-методического комплекса кафедры на электронных носителях по курсу "Теоретическая механика". На кафедре были открыты аспирантура и докторантура.

В.Д. Кухарь возглавляет направление "Математическое моделирование процессов холодной и горячей объемной штамповки заготовок". При его участии разработаны и внедрены в производство новые технологические процессы сборочных и формообразующих операций магнитно-импульсной штамповки полых цилиндрических заготовок, а магнитно-импульсные установки серии "МИУ-Т" внедрены на предприятиях Тулы и других городов России.

Научные труды В.Д. Кухаря известны как у нас в стране, так и за рубежом. Он является автором более 250 научных статей, 11 монографий, 11 охранных документов на изобретения и полезные модели.

При его научном руководстве и консультации защищены 4 докторские диссертации и более 75 кандидатских. В.Д. Кухарь являлся членом Советов по защите диссертаций в Тульском государственном университете, Липецком и Орловском государственных технических университетах, в настоящее время он член двух диссертационных советов Тульского государственного университета (председатель и заместитель председателя).

В.Д. Кухарь внес значительный вклад в подготовку кадров и развитие системы высшего образования.

В 1996 г. Владимир Денисович избран членом-корреспондентом Академии естествознания, в 1997 г. – академиком Академии проблем качества, а в 2000 г. – академиком Академии инженерных наук.

В 2001 г. ему во второй раз присуждена премия имени С.И. Мосина, в этом же году присвоено звание "Почетный машиностроитель", он награжден нагрудным знаком "Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации".

В 2003 г. В.Д. Кухарь удостоен звания Лауреата Всероссийского конкурса "Инженер года" в номинации "Машиностроение".

В 2007 и 2011 гг. ему вместе с коллективом авторов присуждены премии Правительства Российской Федерации в области образования.

В 2009 г. В.Д. Кухарю присуждена премия им. Б.С. Стечкина.

Коллектив редакции и редакционный совет журнала желают Владимиру Денисовичу крепкого здоровья, благополучия и дальнейшей плодотворной деятельности на благо России!