ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(Кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства)

№ 9 сентябрь 2007

Председатель редакционного совета и Главный редактор
СЕМЁНОВ Е.И.

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

Зам. Главного редактора
КЛЕЙЗЕР П.Е.

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

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

Журнал зарегистрирован в Государственном Комитете Российской Федерации по печати.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-12218 от 29.03.02

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Литейное и сварочное производства

Семёнов В.И. Зарождение кристаллической фазы при затвердевании металлов . . . 3

Болдырев Д.А., Давыдов С.В., Сканцев В.М. Экономическая оценка эффективности внедрения новых модификаторов в чугунолитейном производстве . . . 9

Боков А.А., Кроль Б.О., Раздин В.Н., Теренков Г.С. Машина сварки трением . . . 16

Балановский А.Е. Плазменные технологии в промышленности: состояние и перспективы. *(Продолжение)* . . . 19

Кузнечно-штамповочное производство

Ткачёв И.В. Влияние формы потери устойчивости заготовок на технологические возможности гибки на валковых машинах . . . 26

Петров Н.В., Злобин С.Н. Математическая модель процессов в кривошипном прессе с гидродемпфером . . . 29

Ковалёв В.Г., Рыбаков А.В. Автоматизация проектирования технологических процессов листовой штамповки. Часть 2. Примеры проектирования . . . 33

Прокатно-волочильное производство

Сёмин П.В., Сёмин В.А., Лисунец Н.Л. Влияние частоты вращения заготовки и инструмента на процесс раскатки дисков в изотермических условиях . . . 42

Материаловедение и новые материалы

Гуревич Ю.Г. Использование отходов серого чугуна для производства износостойкого композиционного материала . . . 45

Единая система защиты от коррозии и старения. Алюминий, магний и их сплавы. Методы ускоренных коррозионных испытаний по ГОСТ 9.913–90 . . . 48

Информация

Закиров Р.А. Экспериментальное исследование разделения круглого сортового проката плоскими клиновыми ножами . . . 54

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

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

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

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

SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

BLANKING PRODUCTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

(Forging and stamping, foundry and others productions)

№ 9 September 2007

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

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

Editorial Assistants
KLEYZER P.E.

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

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

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

An advertiser is responsible for the promotional materials

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

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

CONTENTS

Casting and Welding Productions

Semenov V.I. Nucleation of crystal phase during melt solidification 3

Boldyrev D.A., Davydov S.V., Skantsev V.M. Basic principles of economical estimation of effectiveness of new conditioning agents applying in cast iron manufacture 9

Bokov A.A., Krol' B.O., Razdin V.N., Terenkov G.S. Friction welding machine 16

Balanovsky A.E. Industrial plasma technologies: current status and future trends. (*Continuation*) 19

Forging and Stamping Productions

Tkachev I.V. Influence of the of stability loss on technological possibilities of bending on roller-bending machines 26

Petrov N.V., Zlobin S.N. Mathematical model of processes in screw press with hydrodamper 29

Kovalev V.G., Rybakov A.V. Automation of designing of sheet stamping technological processes. Part 2. Examples of designing 33

Rolling and Drawing Productions

Semin P.V., Semin V.A., Lisunets N.L. Influence of the blank's rotation frequency relatively to the tool on the discs expansion in isothermal conditions 42

Physical Metallurgy and New Materials

Gurevich Yu.G. Grey iron waste for wearproof composite material manufacture 45

Unified system of corrosion and ageing protection. Aluminium, magnesium and their alloys. Methods of accelerated corrosion tests by GOST 9.913–90 48

Information

Zakirov R.A. Experimental researches of cutting of rounds by plane wedge-like knifes 54

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

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

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

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

Зарождение кристаллической фазы при затвердевании металлов

Рассмотрены необратимые процессы в пределах малых локальных объемов, на которые делятся межатомные конфигурации охлаждаемого расплава при понижении температуры ниже ликвидуса. Потеря устойчивости этими структурами вызывает процессы, способные обеспечить зарождение гетерогенной границы и рост новой фазы.

The article considers irreversible processes within the limits of small local volumes of interatomic configurations of the cooled melt when the temperature lowers under liquidus. Loss of stability of these structures activates the processes that can ensure the nucleation of heterogenous bound and the growth of the new phase.

Производство отливок с заданными эксплуатационными свойствами – фундаментальная научно-производственная задача машиностроения. Она стоит в ряду задач, позволяющих решать такие глобальные вопросы, как экономия энергоресурсов, машиностроительных материалов, экологическая безопасность и др. Главное направление ее разработки – изучение процессов при затвердевании расплава для создания методов управления формированием требуемой гетерогенной структуры промышленных сплавов с заданными свойствами в конкретных условиях литья.

Затвердевание расплава начинается, когда он охлажден ниже температуры плавления. В нем возникают отдельные области новой, термодинамически более устойчивой фазы. Число их увеличивается, они растут, взаимодействуют и образуют соответствующее скорости охлаждения кристаллическое строение. В изложенную схему развития фазового процесса естественным образом включаются перемещения фазовых границ, которые разделяют области разных фаз, а также одной и той же фазы, имеющие различную ориентировку в пространстве.

Трудно понять развитие фазового превращения, не располагая информацией о возможных равновесиях частиц (атомов) в составе межатомных конфигураций расплава. При зарождении и росте новой фазы концентрация компонентов или степень порядка межатомной конфигурации меняется от значений, отвечающих расплаву, до соответствующих кристаллической структуре. Каждая частица имеет возможность найти для себя среди себе подобных новое устойчивое положение.

Круг проблем устойчивости межатомных конфигураций при фазовом превращении не освещен достаточно полно в соответствующей литературе. По-видимому, устойчивость межатомных конфигураций в значительной мере отвечает за зарождение и рост новой фазы. Поэтому изучение фазового превращения необходимо начинать с рассмотрения условий устойчивости межатомных конфигураций расплава [1].

Следует особо отметить, что в научной литературе и научных кругах, определяющих развитие теории фазовых превращений в металлах и сплавах, сложилась и прочно утвердилась другая, отличная от заявленной в настоящей работе. Имеется в виду, что на промежуточном этапе в исходной метастабильной фазе расплава можно указать центры, из которых начинается превращение. И этот процесс называется зарождением. Зарождение и рост являются результатом перехода отдельных частиц из одной фазы в другую. Переход требует преодоления энергетического барьера и преодолевается за счет тепловой флуктуации.

Для превращения этого типа существует критический размер зародыша, при котором энергетический барьер минимален. Высота энергетического барьера определяет скорость зарождения. Если уменьшать энергетический барьер, то в локальном объеме расплава за то же время будет образовываться все боль-

шее число зародышей и превращение может стать однородным, т.е. происходить одновременно во всех частях. С указанной позиции рассматривают возможности управления эксплуатационными свойствами металлических материалов в литом состоянии.

В расплаве и кристаллах частицы компонентов промышленного сплава определяют свои отношения с соседями по межатомной конфигурации через облако валентных электронов. Валентные электроны придают устойчивость межатомным конфигурациям, которая определяется тем, что единому облаку валентных электронов сплава присуща оптимальная электронная плотность; на этом основан и метод прогнозирования фазовой стабильности промышленных сплавов – так называемый Md-метод. Он основан на расчете параметра электронной структуры, усредненное значение которого находят по формуле

$$\overline{Md} = \sum C_i (Mdt)_i , \qquad (1)$$

где C_i – концентрация i-го компонента; Mdt – энергетический уровень d-орбиталей компонента.

Исследования подтверждают способность физико-химической системы самопроизвольно устойчиво поддерживать растворимость всех компонентов сплава, если электронный параметр $\overline{Md}$ меньше критического значения. Практика использования $\overline{Md}$-метода показала, что система не просто поддерживает растворимость, а во всех случаях обеспечивает предельную растворимость компонентов.

Силы, которые упорядочивают взаимное расположение частиц в межатомной конфигурации – это химические потенциалы компонентов μ и потенциал E взаимодействия частиц с общим облаком валентных электронов. Если принять расплав однофазной и однокомпонентной системой, то действующие силы складываются и при T, p = const для всех 1, 2, ... n точек межатомной конфигурации частиц соблюдается равенство

$$\mu_1 + E_1 = \mu_2 + E_2 = \ldots = \mu_n + E_n . \qquad (2)$$

Поскольку $\mu = RT \ln C + \mu_0$ и μ_0 повсюду одинаковы, то равенство (2) для произвольной межатомной конфигурации принимает вид

$$C_2 = C_1 e^{-\frac{\Delta E}{RT}} , \qquad (3)$$

где $\Delta E = E_2 - E_1$ – разность потенциалов электронного облака соответственно в первой и второй точках межатомной конфигурации.

Если по какой-либо причине частица изменяет свою активность, то электронное облако, выравнивая электронную плотность и минимизируя энергию Гиббса, возвращает межатомную конфигурацию частиц в равновесное состояние. При этом разность локальных концентраций $\Delta C = C_2 - C_1$ определенного компонента становится тем больше, чем значительней величина ΔE в тех же местах электронного облака.

Формула (3) представляет собой частный случай закона распределения частиц по уровням энергии. В данном случае она показывает, что физико-химическая система имеет возможность диффузионным переносом повышать концентрацию тех компонентов и в тех местах, где увеличиваются некомпенсированные межатомные и межмолекулярные взаимодействия. Наоборот, если взаимодействия ослабевают, то тогда уже химический потенциал μ будет стремиться равномерно рассредоточить сгруппированные частицы. Система самопроизвольно поддерживает совместимость частиц своих компонентов, что обеспечивает ей устойчивое существование.

В охлаждаемом расплаве, теряющем теплоту, самопроизвольно изменяются межатомные взаимодействия. Система реагирует на них образованием межатомных группировок, во взаимном расположении частиц которых начинает все больше соблюдаться степень порядка. Первые такие упорядоченные группы с числом частиц от десятков до сотен – нано-группы – образуются в достаточно перегретом расплаве. Система, поддерживая оптимальное значение $\overline{Md}$-параметра, сосредотачивает в группах с ближним порядком все большее число хаотически расположенных частиц. Вблизи температуры ликвидуса T_L они получают наибольшее развитие.

Современные методы исследования строения расплава подтверждают сходство его атомных структур вблизи T_L с кристаллическим. Структуры с ближним порядком зафиксированы как в одно-, так и в многокомпонентных системах. Поэтому вполне можно согласиться с тем, что строение расплава при $T = T_L$ должно оказывать влияние на кристаллизационный процесс.

При $T = T_L$ значение $\overline{Md}$-параметра, степень порядка и устойчивость межатомного взаимодействия достигают критических величин. Чтобы разрешить силовой дисбаланс в межатомных группах, потенциал E облака валентных электронов направляет свои силы на освобождение конфигураций с ближним порядком от "лишних" частиц, другими словами, от всех тех, которые нарушают устойчивость. В теряющем температуру расплаве они способны теперь существовать только в сбалансированном химическом составе.

Подобный же процесс потери устойчивости можно наблюдать в кристаллических зернах. Потеря устойчивости межатомной конфигурацией зерна проявляет себя образованием субграниц, представляющих собой места скопления лишних частиц. Частицы располагаются слоем вдоль созданной ими субграницы (рис. 1.)

Субграницы возникают при получении монокристаллов, термической обработке, полиморфном превращении, термодиффузионном насыщении и в других случаях, где есть диффузия частиц. Пожалуй, уместно отметить, что в отдельных и обобщающих

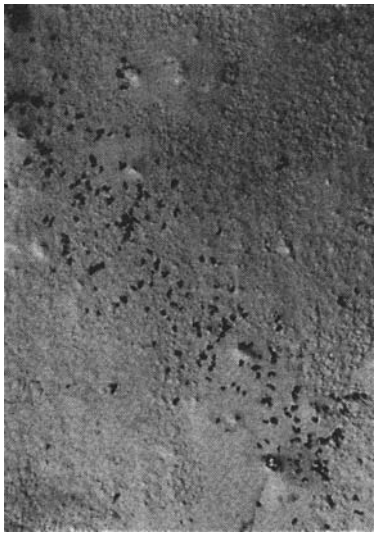

Рис. 1. Самодиффузия ^{63}Ni в никеле при 1000 °С (авторадиодиаграмма-реплика) [2], ×3400

теоретических работах принято проблемы образования и поведения субграниц объяснять опережающей диффузией [2], а не связывать с устойчивостью и поддержанием предельной совместимости частиц межатомных конфигураций.

При потере устойчивости межатомной конфигурации расплава в интервале $T_L...T_S$ "лишние" частицы, чтобы понизить уровень силового взаимодействия с ближним окружением, изменяют строение своих электронных оболочек и отдают полю валентных электронов избыточную энергию [1]:

$$\Delta f_i = f_i^L - f_i^S, \tag{4}$$

где f_i^L и f_i^S – свободные энергии Гиббса соответственно жидкой L и твердой S фаз, приходящиеся на одну частицу i-го компонента сплава.

Электронное облако фазы L получает дополнительное энергосодержание F_{SL}. Плотность энергии поля пропорциональна концентрации i-го компонента C_i:

$$f_{SL} = \frac{\partial F_{SL}}{\partial V} = \sum C_i \Delta f_i N, \tag{5}$$

где N – число Авогадро.

Диффузионный перенос "лишней" частицы выполняет некомпенсированная равнодействующая поля F_{SL}:

$$\Phi_{SL} = \frac{\partial f_{SL}}{\partial r} \frac{1}{n_V^i}, \tag{6}$$

где $n_V^i = C_i N$ – число частиц i-го компонента в объеме V.

Сила Φ_{SL} избирает такое направление диффузионного переноса частицы, которое минимизирует затрачиваемую работу:

$$\varphi_{SL} = \int_0^r \Phi_{SL}\, dr. \tag{7}$$

Термический КПД ($\eta = \Delta T/T$) диффузионного переноса частиц равен нулю. Согласно второму началу термодинамики работа такого процесса в теплоту не превращается. Она может только усиливать энергетическое поле частицы и накапливаться при ней в виде энергии активации $A = \varphi_{SL}$.

Для каждой точки диффузионного переноса "лишней" частицы к субгранице выполняется термодинамическое равенство

$$\Delta E_{SL} + \varphi_{SL} = f^L - f^S, \tag{8}$$

где ΔE_{SL} – потенциал поля F_{SL} на одну частицу. Смысл его в том, что существование диффундирующей "лишней" частицы в квазиустойчивой межатомной конфигурации расплава обеспечивают совместно потенциал ΔE_{SL} поля F_{SL} и собственный потенциал A энергии активации. Во время диффузионного переноса потенциал A частицы растет. Достигнув максимального значения ($A_{\max} = \Delta f_i$), он способен обеспечить самостоятельно сбалансированную совместимость SL-частицы с соседними частицами субграницы.

Поле F_{SL} обеспечивает поддержание квазиустойчивого состояния межатомной конфигурации фазы L за счет вариации потенциала ΔE_{SL}. Диффундирующие частицы скапливаются и образуют субграницу, тогда $\lim \Delta E_{SL} \to 0$.

Изложенное показывает, что в расплаве при $T = T_L$ начинаются существенные структурные изменения. Они определяются тем, что межатомные конфигурации предельной степени порядка, переходя в квазиустойчивое состояние, создают концентрационные субграницы, способные адаптироваться к внешним воздействиям и обеспечить самоуправляемый синтез новых гетерогенных структур.

В механизме самоорганизации фазового превращения главную роль играют "лишние" частицы. Поскольку они связаны с интервалом $T_L...T_S$ затвердевания расплава, то далее по тексту они обозначены как SL-частицы, а межатомная конфигурация предельной степени совместимости, перешедшая в квазиустойчивое состояние, – структурный фазовый m-элемент расплава.

В общем случае скорость возрастания массы m_{SL}^m SL-частиц в объеме V_m структурного фазового элемента m пропорциональна скорости изменения их концентрации:

$$\frac{\partial m_{SL}^m}{\partial \tau} = \frac{\partial C_{SL}}{\partial \tau} V_m. \tag{9}$$

По закону Фика скорость переноса диффузией вещества m_{SL}^{m} к субгранице S_m объема V_m равна

$$\frac{\partial m_{SL}}{\partial \tau} = -D\frac{\partial C_{SL}}{\partial r}S_m, \qquad (10)$$

где D – коэффициент диффузии; $\frac{\partial C_{SL}}{\partial r}$ – градиент концентрации диффундирующего вещества; S_m – площадь поверхности.

Из уравнений (9) и (10) получаем

$$\frac{\partial C_{SL}}{\partial \tau} = -\frac{D}{R_m}\frac{\partial C_{SL}}{\partial r}, \qquad (11)$$

где $R_m = V_m/S_m$.

Физический смысл параметра R_m указывает на то, что структурный фазовый элемент m должен иметь размер, который самоустанавливается, согласуясь с темпом выделения и условиями диффузионного переноса SL-частиц.

Дистанция R_m диффузионного переноса превышает на несколько порядков межатомные расстояния. Силы вязкого сопротивления успевают стабилизировать скорость SL-частиц. Поэтому их распределение по дистанции переноса R_m должно подчиняться статистике (3). Полагая, что на частицу действует потенциал $\Delta E = \Delta E_{SL}$, из уравнения (3) получим

$$C_{SL}^{V_m} = C_{SL}^{S_m} e^{-\frac{\Delta E_{SL}}{kT}}, \qquad (12)$$

где $C_{SL}^{S_m}$ – концентрация SL-частиц субграницы S_m; $C_{SL}^{V_m}$ – концентрация их же по дистанции переноса в объеме V_m; $k = R/N$ – постоянная Больцмана.

Линейная скорость v_{SL} переноса SL-частиц и скорость переноса диффузией их массы через единицы площади S в единицу времени связаны равенством:

$$\frac{1}{S}\frac{dm_{SL}}{d\tau} = \mathrm{v}_{SL}C_{SL}. \qquad (13)$$

С использованием уравнений (9) и (10) равенство (13) приводим к виду

$$\bar{\mathrm{v}}_{SL} = \frac{\Delta E_{SL,\,\max}}{kT}\frac{D}{\bar{r}} = \frac{\bar{\Phi}_{SL}}{kT}D, \qquad (14)$$

где знак "–" указывает на средние значения величины параметров: скорости, дистанции переноса и действующей силы.

Из равенства (14) следует, что скорость переноса при фазовом превращении является переменной величиной и определяется произведением относительного энергетического потенциала фазового превращения $\Delta E_{SL,\,\max}/kT$ на относительный коэффициент переноса $D/\bar{r}$ (отношение коэффициента диффузии D к средней дистанции переноса $\bar{r}$ SL-частиц). Относительный коэффициент переноса имеет такую же размерность, как скорость: м/с. Если $\Delta E_{SL,\,\max}/kT = 1$, то $\bar{\mathrm{v}}_{SL} = D/\bar{r}$. Поэтому параметр $\Delta E_{SL,\,\max}/kT$ можно рассматривать в качестве пропорционального множителя между v_{SL} и относительным коэффициентом переноса. Из уравнения (14) следует также, что отношение D/kT – это проводимость среды при переносе SL-частиц.

В результате исследования процессов среды фазового структурного элемента можно отметить следующее. В отличие от самодиффузии элементов в расплаве работа диффузионного переноса SL-частиц сохраняется при них в виде энергии активации. Поэтому они, двигаясь совместно со средней скоростью $\bar{\mathrm{v}}_{SL}$, создают поток энергии активации

$$q_A = f_{SL}^{V_m}\bar{\mathrm{v}}_{SL} = AC_{SL}^{V_m}N\bar{\mathrm{v}}_{SL}, \qquad (15)$$

который, как и они сами, направлен к субгранице S_m фазового элемента.

Одновременно в охлаждаемом расплаве действует тепловой поток. Его направление и величину определяет градиент температуры

$$q_T = -\lambda \mathrm{grad}T, \qquad (16)$$

где λ – теплопроводность расплава.

Потоки энергии от разных источников, которые передаются в среде через одни и те же частицы, имеют свойство взаимодействовать. Обеспечивая устойчивость среды фазового структурного элемента, поток q_A самопроизвольно устанавливается ортогонально потоку q_T, чем создается независимость диффузионного переноса SL-частиц от интенсивности теплоотвода. Отсюда непосредственно следует, что на начальном этапе фазового превращения субграница S_m не охватывает полностью структурный m-элемент, а располагается только на части его поверхности.

Если следовать статистике (12), субграница S_m может быть представлена стопкой, сложенной из большого числа листов толщиной в одну SL-частицу. Эта диффузная граница, имеющая посредине максимальную напряженность силового поля энергии активации A

$$f_{SL}^{S_m} = AC_{SL}^{S_m}N. \qquad (17)$$

Равнодействующие силы $\Phi_{SL}^{S_m}$ поля энергии активации A выравнивают отдельные сегменты субграницы S_m и стремятся придать всей субгранице полиэдрическую форму (рис. 2).

Полиэдрическая диффузная S_m-граница имеет вид открытой по торцам сотовой поверхности. Однонаправленный теплоотвод разрешает диффузию SL-частиц только в секущей плоскости и в параллельных ей плоскостях. S_m-граница каждого структурного фазового m-элемента (обособленный межатомной конфигурации) замкнутая. Характерный размер фазового элемента определяется удвоенной величиной дистанции переноса SL-частиц: $d = 2R_m$. Поскольку сосед-

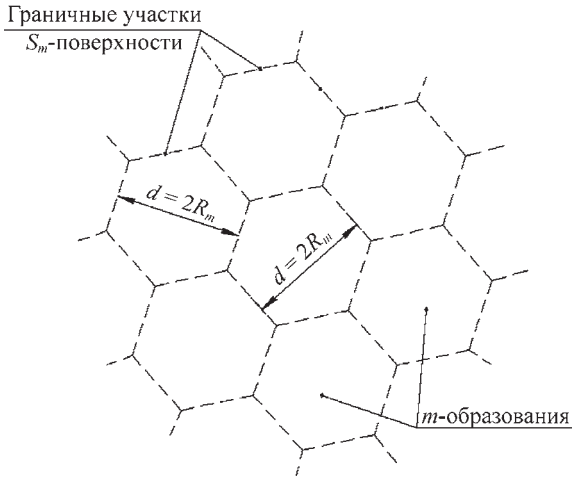

Рис. 2. Структурные фазовые элементы в секущей плоскости, ортогональной теплоотводу

ние фазовые элементы образуются в равных условиях, то имеют близкое значение d-параметра.

Сотовая S_m-граница (рис. 2) образуется при скорости охлаждения расплава 0,01...10 К/с. Эти скорости ответствуют производству отливок в песчаные формы, литью в кокиль, непрерывному литью в кристаллизатор. Сотовая субграница формирует ячеистый фронт кристаллизации, управляет ростом столбчатых кристаллов. Частично сформированная в пристеночной зоне субграница участвует в образовании поверхностных дендритов и зоны "замороженных" кристаллов в отливках.

Полиэдрическая форма S_m-поверхности фазовых образований расплава обладает устойчивостью, так как при q_T = const плотность энергии $f_{SL}^{S_m}$ среднего слоя, достигнув предельного значения, дальше возрастать не может согласно статистике (12), а все поверхностные силы плоских граней уравновешены. Устойчивая S_m-субграница гарантирует получение отливок с управляемой направленной структурой при всех основных схемах процессов направленной кристаллизации, включая литые изделия с монокристаллической структурой.

В условиях естественной кристаллизации металлов и сплавов интенсивность q_T однонаправленного теплоотвода монотонно понижается, что снижает интенсивность потока q_A, и, как следствие, ведет к падению энергосодержания F_{SL} субграницы и уменьшению сил $\Phi_{SL}^{S_m}$, которые упорядочивают расположение ее частиц. Перестройка зарождается в самих межатомных конфигурациях фазовых структурных m-образований. Минимизируя затраты энергии на диффузионный перенос SL-частиц, система самопроизвольно увеличивает, соответственно новым условиям, параметр R_m, и инициируя процесс поглощения мелких более крупными ячейками сотовой субграницы. Укрупнение сотовых ячеек субграницы ведет к выклиниванию части кристаллов растущей столбчатой зоны отливок и слитков.

При дальнейшем снижении энергосодержания F_{SL} диффузная субграница переходит в квазиустойчивое состояние – режим совместного накопления SL-частиц и энергии активации с последующей разовой передачей их фронту кристаллизации. Эти частицы субграницы вступают в кристаллизационный процесс, когда плотность энергии $f_{SL}^{S_m}$ среднего слоя достигает уровня фазового превращения, силы которого способны формировать кристаллические ячейки. Квазиустойчивое состояние субграницы вызывает образование вторичных ветвей дендритов и смену фронта кристаллизации с ячеистого на дендритный.

При очень низких скоростях охлаждения ($10^{-3}...10^{-4}$ К/с) понижение энергосодержания F_{SL} субграницы может дополнительно происходить за счет адсорбции. Такие адсорбционные процессы ведут к сокращению S_m поверхности субграницы до минимума. Эти процессы особенно актуальны для центральных частей затвердевающего расплава, где интенсивность теплового потока q_T минимальна. В центральной зоне полиэдрическая субграница распадается на примитивные диффузные пластичные, игольчатые, сферические образования, способные существовать при пониженной плотности избыточной энергии активации их границ. Роль таких диффузных примитивов становится заметной при образовании гетерогенной структуры теми компонентами расплава, которые затвердевают в конце интервала кристаллизации $T_L...T_S$. Это помогает, в частности, лучше понять структурообразование при кристаллизации эвтектик.

Скорости охлаждения свыше 10^4 К/с только усиливают развитие неустойчивости в межатомных конфигурациях. Хорошо известно общепризнанное равенство

$$d = a\mathrm{v}^n, \qquad (18)$$

где d – дендритный параметр; v – скорость охлаждения расплава; a и n – постоянные.

Постоянную a связывают со свойствами сплава. Установлено, что значение n слабо зависит от материала и находится в диапазоне 0,25...0,5. Для равноосных зерен принимают n = 1/3; тогда при увеличении скорости охлаждения на три порядка дендритный параметр d уменьшается на порядок. Зависимость (18) фиксируется вплоть до ультравысоких скоростей охлаждения (10^{12} К/с).

Дендритный параметр d служит показателем периодичности литой структуры. Связывая его с устойчивостью межатомных конфигураций расплава, из экспериментального равенства (18) можно сделать вывод, что оно непосредственно отображает самоподобное деление межатомной конфигурации – целого на части. С этих позиций дендритный параметр d связан с дистанцией R_m диффузного переноса SL-частиц. В итоге $d = 2R_m$.

Способность субграницы охватывать структурные фазовые m-элементы обеспечивают поверхностные

силы. Выравнивая накопленную избыточную энергию активации, они переносят *SL*-частицы вдоль субграниц. Хотя скорость переноса *SL*-частицы здесь высокая, но в этом уникальном структурно-временном принципе действия с увеличением скорости охлаждения скорость охвата структурных *m*-элементов отстает от скорости их образования, а это проявляет себя сокращением количества структурных ячеек (*m*-образований) дендритного зерна. При ультравысоких скоростях охлаждения кристаллическое зерно сокращается до одной ячейки – образуется недендритное зерно.

При высоких скоростях охлаждения возможно образование новых структур за счет взаимодействия диссипативного теплового потока с потоком энергии активации. Механизм самоорганизации фазового превращения накапливает при частицах дополнительно энергию их взаимодействия. Частицы имеют возможность повысить уровень энергии активации до предельного, до того как достигнут границ *m*-образования. Они начинают взаимодействовать и создают примитивные кристаллические ячейки по ходу диффузионного переноса. Сферолиты, фиксирующие перенос частиц, наблюдаются в тонких пленках и при быстрой кристаллизации эвтектик.

Энергия активации *A* диффузионного переноса частицы фазового *m*-элемента при достижении предельной величины способна превращаться в тепловую энергию *Q*. Этот переход, дискретный на уровне частиц, непрерывен на макроуровне и обратим:

$$\overline{A} + \overline{Q} = f^{L} - f^{S}, \qquad (19)$$

где $\overline{A}$ и $\overline{Q}$ – макропеременные, приходящиеся на одну частицу. Отдавая избыток тепловой энергии *Q*, межатомная конфигурация становится устойчивой по отношению к окружающей среде.

Равенства (8) и (19) определяют переходное состояние частицы при смене фазового состояния. Каждая частица фазового *m*-элемента имеет два переходных состояния: диффузионное и тепловое. Состояния следуют одно за другим и получают обратную последовательность при смене направления фазового превращения, тем самым они показывают, что затвердевание и плавление – это обратные процессы, связанные конкуренцией за тепловую энергию. Плавление и затвердевание приводят межатомную конфигурацию частиц в равновесие, достигая этого при заданных внешних воздействиях.

Выводы

1. Самоорганизация зарождения кристаллической фазы обусловлена накоплением избыточной свободной энергии межатомными конфигурациями частиц охлаждаемого расплава. Основой этого эффекта служит изменение взаимодействия частиц при понижении (повышении) температуры среды. Способность физико-химической системы упорядочить межатомные конфигурации частиц ограничена, на что прямо указывает Md-метод прогнозирования фазовой стабильности промышленных сплавов. Упорядочивание частиц в структуры с ближним порядком ведет к накоплению расплавом избыточной свободной энергии. При $T = T_L$ расплав исчерпывает возможность накопления избыточной свободной энергии: Md-параметр, степень порядка и устойчивость межатомного взаимодействия частиц достигают критических величин.

2. Потеря устойчивости ведет к самоуправляемой перестройке частиц межатомной конфигурации. В природных физико-химических системах при потере устойчивости целое делится на части, повторяя определенные структуры. Сложилась даже парадигма о фрактальной геометрии природы от атома до объектов галактики. Неустойчивость возбуждает энергетический и диффузионные обмены, которые способны минимизировать свободную энергию в связи со стремлением межатомной конфигурации принять равновесное состояние.

Развитие необратимых процессов в соответствии с принципом минимизации избыточной свободной энергии создает самоподобные фрактальные структуры адаптации двух структурных уровней: 1) фазовые структурные *m*-элементы (микроуровень); 2) субграница (наноуровень).

Показателем периодичности повторения фрактальных структур является дендритный параметр *d* (18), который самоустанавливается с учетом скорости охлаждения v. Состояние *m*-элементов и субграницы определяют две группы параметров: 1) концентрация компонентов, определяющая химический состав; 2) удельная плотность избыточной свободной энергии. Она устанавливает силы, скорости диффузионного переноса и распределение частиц по уровням энергии.

3. Структуры фрактальной адаптации взаимодействуют с тепловым диссипативным потоком. Выбор пути понижения избыточной свободной энергии на принципе минимизации предполагает выполнение двух условий. Первое состоит в том, что обменные энергетические потоки структур адаптации с тепловым потоком должны быть эквивалентны. Второе – возможность независимого развития собственных процессов. Используя термодинамические силы, которые минимизируют термический КПД, диффузионные и энергетические потоки *m*-элементов самопроизвольно ориентируются ортогонально тепловому потоку и устанавливают пространственное положение субграницы.

4. Работа диффузионного переноса частиц *m*-элементов сохраняется при них в виде энергии активации. Такой процесс ведет к тому, что вместе с частицами накапливается энергия активации. Силы энергии активации, размещая частицы, стремятся охватить общей субграницей максимальное количество соседних *m*-элементов. Тем самым они создают третий струк-

турный уровень фазового превращения – макроуровень.

Избыточная свободная энергия превращает ориентированную субграницу, химический состав которой отвечает новой фазе, в упорядоченную структуру. Параметры ее порядка возрастают по нормали к центральному слою (зоне), где согласно статистике (12) плотность энергии активации предельна. Частицам достаточно всего лишь изменить межатомные расстояния, чтобы этот слой субграницы стал гетерогенной границей, при которой к тому же сохраняется диффузная граница раздела фаз. Межфазная упорядоченная граница имеет возможность двигаться за счет организованного диффузного переноса "лишних" частиц.

5. Превращение субграницы в гетерогенную границу и фазовое превращение происходят за счет способности энергии активации превращаться в тепловую и удаляться с теплоотводом. Этот процесс обратим. Подвод энергии вызывает обратный процесс – плавление. Плавление и затвердевание являются связанными процессами, что определяет существование связи структур жидкого и твердого состояний.

6. Способность фазового превращения к самоорганизации открывает возможность выявления простых и надежных методов улучшения структуры и свойств промышленных сплавов при производстве литых заготовок в машиностроении.

ЛИТЕРАТУРА

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

2. **Каблов Е.Н.** Литые лопатки газотурбинных двигателей. М.: МИСИ, 2001. С. 35–118.

Вячеслав Иванович Семёнов, канд. техн. наук

УДК 669.131.6

Д.А. Болдырев, С.В. Давыдов, В.М. Сканцев
*(Исследовательский центр ОАО "АВТОВАЗ", г. Тольятти,
Брянский государственный технический университет)*

Экономическая оценка эффективности внедрения новых модификаторов в чугунолитейном производстве

Рассмотрены общие подходы оценки экономической эффективности внедрения новых модификаторов при производстве литых чугунных заготовок, представлены зависимости определения показателей качества и работоспособности модификаторов, а также их стоимости при изменении концентрации активных химических элементов, входящих в состав модификаторов.

The article considers general approaches to estimation of economical efficiency of introduction of the new types of conditioning agents at iron castings production.

Повышение эффективности литейного производства во многом определяется выбором и внедрением наукоемких и прогрессивных в технико-экономическом отношении способов производства литых заготовок.

Выбор наиболее эффективного варианта изготовления отливок должен определяться на основе комплексного анализа технической, организационной и экономической целесообразности. Это осуществляется на основе расчета соответствующих показателей: технических, организационных, технико-экономических и экологических.

К числу *технических показателей*, используемых при выборе варианта изготовления отливок, можно, например, отнести коэффициенты выхода годного литья от массы шихты и жидкого металла; коэффициент точности отливок по массе, показатели, характеризующие приспособленность отливки к механической обработке (шероховатость, размерная точность, твердость), а также процент угара, процент брака и др.

К числу *организационных показателей* могут быть отнесены размер партии отливок; длительность производственного цикла; коэффициент ритмичности производства; коэффициент сменности и др.

Однако и технические, и организационные показатели носят частный характер, несопоставимы между собой и не выражают всех затрат общественного труда. Это вызывает необходимость расчета показателей сравнительной экономической эффективности

вариантов получения литых заготовок, которые могут быть частными и общими.

К *частным* (*технико-экономическим*) *показателям* относятся показатели, выражающие отдельные элементы затрат общественного труда. При этом технико-экономические показатели, как правило, измеряются не в стоимостном выражении. К ним относятся трудоемкость изготовления отливок: машиноемкость отливки или тонны отливок; материалоемкость отливки; энергоемкость отливки или тонны отливок, а также ряд других. Однако на основе частных (технико-экономических) показателей нельзя судить об экономической эффективности сравниваемых вариантов техники, технологии и организации производства, поскольку эти показатели не отражают всех затрат, т.е. носят частный характер, несопоставимы между собой и обычно разнонаправлены (например, уменьшение материалоемкости отливки, как правило, связано с увеличением трудоемкости ее изготовления).

Следовательно, для окончательного вывода об эффективности выбираемого варианта необходимо определение соответствующего общего экономического показателя.

К числу *общих экономических показателей* в соответствии с принятой методикой расчета относятся себестоимость продукции (экономия от снижения себестоимости), величина дополнительно привлеченных средств и их капиталоотдача и т.д.

Наиболее перспективными методами оценки эффективности внедряемых технологических и организационных мероприятий является построение моделей взаимосвязи между основными показателями работы производства (коэффициент выхода годного литья, экономия от снижения себестоимости и др.) и характеристиками внедряемого мероприятия.

Однако такой подход требует проведения предварительных исследований (научно-исследовательских, технологических, экономических и пр.) в рамках конкретного производства, но в последующем значительно упрощает процедуру оценки эффективности предлагаемых изменений в технологической и организационной цепочках производственного процесса.

На современном этапе развития науки и техники максимальные резервы повышения качества литых сталей и чугунов заложены в возможности активного и целенаправленного формирования их структуры и свойств. Одним из способов достижения этого является введение в расплавы в предкристаллизационный период модификаторов и микролегирующих добавок. Правильно организованное модифицирование и микролегирование чугуна и стали оптимально подобранными модификаторами является наиболее простым, дешевым и высокоэффективным методом повышения технико-экономических и технологических показателей металлоизделий.

Известно достаточно большое количество модификаторов для различных чугунов, но каждый из них имеет свои специфические свойства и различную эффективность применения в тех или иных условиях литейного производства, поэтому разработка методик оценки эффективности модификаторов в условиях конкретного производственного процесса литых заготовок является актуальной задачей.

При решении этой комплексной задачи необходимо рассмотреть два основных направления оценки эффективности применения модификаторов:

1. Определение оптимального соотношения (в количественном выражении) химических элементов в составе модификатора. Здесь критерий оптимальности определяется при сопоставлении модифицирующей эффективности работы модификатора в зависимости от содержания активного элемента и стоимости модификатора в целом.

2. Оценка модифицирующей способности модификаторов постоянного состава (типовые модификаторы) в различных технологических условиях литейного производства, когда марки чугуна могут значительно отличаться по своему химическому составу друг от друга. В этом случае обобщенным критерием эффективности модификатора служит соотношение его стоимости и степень проявления модифицирующего эффекта на данной марке модифицируемого чугуна.

Первый подход оценки эффективности применения модификаторов основан на том, что работоспособность (эффективность) модификатора (A)* в зависимости от содержания активного элемента (или элементов) растет только до его определенной предельной концентрации (C_0). Величину C_0 можно считать своеобразной точкой "бифуркации" (рис. 1, *а*, точка *f*), так как свыше концентрации C_0 эффективность модификатора либо постепенно снижается (см. рис. 1, *а*, кривая *1*), либо модификатор полностью перестает работать (см. рис. 1, *а*, кривая *2*). Таким образом, концентрация C_0 активного элемента (элементов) в модификаторе, позволяющая максимально повысить его работоспособность до уровня A_{max} (см. рис. 1, *а*), является одновременно и оптимальной, и предельной.

Рассмотрим это положение в применении к оценке степени усвоения модификатора и его стоимости (см. рис. 1, *б*, *в*). Усвояемость (У) активного элемента (элементов) в модификаторе в первом приближении обратно пропорциональна его концентрации (У ~ 1/C). Ниже определенной минимальной концентрации (C_{min}) активного элемента усвоение протекает полностью ($У_{max}$).

При повышении концентрации активного элемента до некоторой величины (C_{max}) в определенный момент наступает порог насыщения, свыше которого

*Под работоспособностью модификатора в данной статье понимаются следующие компоненты эффективности модифицирования: длительность модифицирующего эффекта; снижение глубины (степени) отбела; стабилизация механических свойств; подавление выделения первичного феррита и графитной эвтектики; измельчение графитной фазы и т.п.

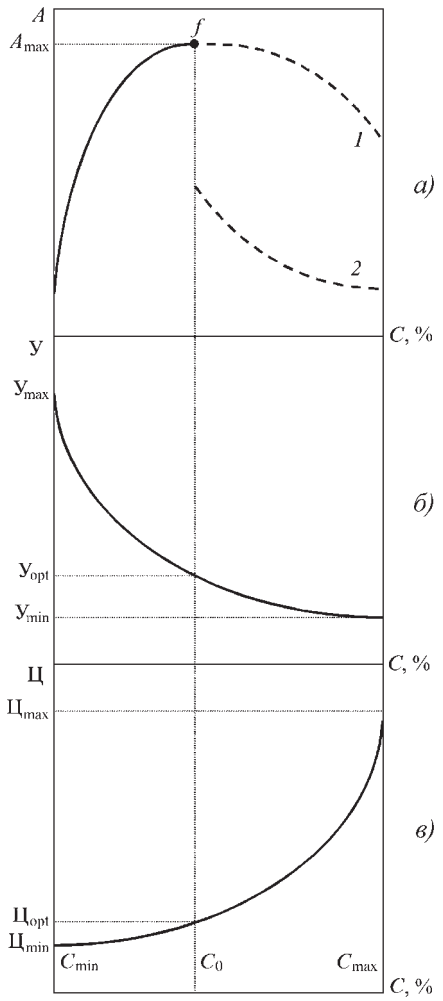

Рис. 1. Взаимосвязь активности (*а*), усвояемости (*б*) и стоимости модификатора (*в*):
C – содержание активного элемента в модификаторе, %; *A* – работоспособность модификатора с активным элементом; У – усвояемость активного элемента в модификаторе; Ц – стоимость модификатора с активным элементом

усвояемость уже не увеличивается ($У_{min}$). При этом в интервале от $У_{min}$ до $У_{max}$ существует какая-то оптимальная усвояемость ($У_{opt}$) активного элемента, которая соответствует оптимальной (предельной) эффективности модификатора A_{max} при определенной предельной концентрации C_0 (см. рис. 1, *б*).

Стоимость (Ц) модификатора с активным элементом (элементами) в обобщенном виде можно представить как экспоненциальную функцию от концентрации: Ц ~ exp(*C*) (более точную зависимость определяют экспериментальным путем для каждого типа модификаторов в конкретных производственных условиях) и в то же время как величину, обратную его усвояемости У.

Минимальная цена модификатора $Ц_{min}$ соответствует минимальному содержанию активного элемента C_{min} при его максимальном усвоении. Цена модификатора возрастает с увеличением содержания активных элементов в модификаторе при постепенном снижении их усвояемости в нем. Исходя из этого, предельная концентрация активного элемента C_0, обеспечивающая модификатору предельную (оптимальную) работоспособность A_{max}, характеризуется оптимальными усвояемостью $У_{opt}$ и стоимостью модификатора $Ц_{opt}$ (см. рис. 1, *в*).

Предлагаемый подход к оценке эффективности модификатора также обязательно должен включать в себя выбор базовой компоненты работоспособности модификатора. Под этим выбором понимается целенаправленная оценка конкретного проявления эффекта модифицирования, обеспечивающего решение существующей технологической, производственной или экономической проблемы изготовления отливки.

Например: при наличии длительного цикла транспортировки разливочного ковша от плавильной печи до литейной формы – максимальная длительность эффекта модифицирования; для стабилизации твердости и оптимизации механической обработки – способность модификатора подавлять выделение первичного феррита и эвтектического графита; для улучшения комплекса механических и эксплуатационных свойств – способность модификатора к регулированию и управлению структурными характеристиками отливки и т.д.

При этом следует учитывать, что предельная концентрация активного элемента C_0, обеспечивающая в полном объеме реализацию или проявление выбранной компоненты эффективности модифицирования, может значительно отличаться при проявлении максимальной эффективности модифицирования для других компонент.

Следует отметить, что функционально существующие типы модификаторов могут быть специальными (для реализации конкретной компоненты эффекта модифицирования) и универсальными, когда эффект модифицирования проявляется в полном объеме [1].

Кроме указанных мероприятий необходимо провести и технологическую оптимизацию процесса модифицирования, состоящую из анализа следующих задач:

1. Оценка степени усвоения модификатора. Необходимо учитывать, что эта степень определяется как минимум двумя важнейшими параметрами процесса модифицирования: температурой модифицирования и гранулометрическим составом модификатора, которые подлежат оптимизации для конкретных условий производства (тип плавки, объем разливочного ковша, температура выпуска расплава и т.д.).

2. Оптимизация количества вводимого модификатора от массы металла или процент ввода. В зависимости от содержания активного компонента в модификаторе (например, кремния), вводимого количества и степени усвоения модификатора зависит его остаточное содержание в расплаве, которое будет накладываться на содержание данного элемента в объеме печного расплава. В противном случае произойдет

неконтролируемое колебание содержания активного элемента в отливке, что может привести к нестабильности свойств.

3. Выбор способа ввода модификатора в расплав.

Таким образом, основные задачи работ по повышению эффективности, совершенствованию существующих методов графитизирующей обработки чугуна модификаторами, а также внедрение новых методов модифицирования и типов модификаторов должны заключаться в следующем:

1. Определение компоненты эффективности модифицирования и комплекса технологических задач, решаемых данной компонентой.

2. Определение необходимого содержания активного элемента (элементов) в модификаторе, обеспечивающего максимальную эффективность модификатора и, соответственно, минимизацию его расхода.

3. Технологическая оптимизация выбранного типа модификатора.

4. Корректировка содержания активного элемента (элементов) в печном расплаве с содержанием активного элемента (элементов) в модификаторе, обеспечивающего минимальный расход модификатора, при максимальном проявлении выбранной компоненты эффекта модифицирования.

Справедливость рассмотренного подхода подтверждается анализом конкретных технологий модифицирования.

В качестве примера можно привести модификатор Sibar®22 (NPP Company, г. Челябинск) с содержанием бария 20...25 % и кремния 45...60 %. Согласно проведенным исследованиям [2] установлено, что увеличение концентрации бария в модификаторе повышает эффективность компоненты модифицирования (снижение отбела чугуна на ступенчатой пробе) и при 25 % бария является достаточным введение в чугун 0,5 % такого модификатора. Дальнейший рост концентрации бария в модификаторе (до 35 %) не вызвал дополнительного снятия отбела и является нецелесообразным.

В частном случае функция ценообразования для барийсодержащего модификатора согласно предлагаемому подходу (см. рис. 1) в зависимости от содержания активного элемента в его химическом составе можно представить в виде следующей линейной зависимости (рис. 2):

$$C_m = 2715M + 33800, \qquad (1)$$

где C_m – стоимость 1 т барийсодержащего модификатора, руб.; 2715 – коэффициент, характеризующий стоимость бария, энергетические и материальные затраты при производстве модификатора; 33800 – стоимость 1 т типового ферросилиция, руб.; M – содержание бария в модификаторе, %.

Представленная зависимость (см. рис. 2) отлично работает в интервале предельной C_0 концентрации Ba (до 25 %) и позволяет в полной мере оценить стои-

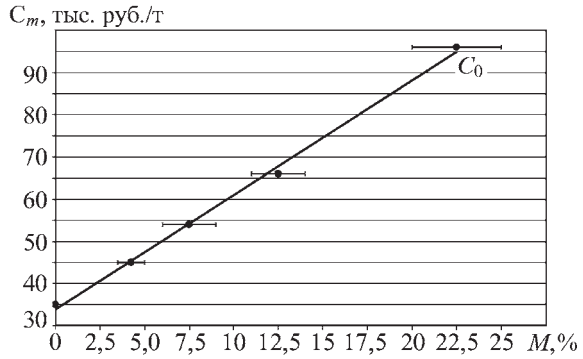

Рис. 2. Зависимость стоимости барийсодержащего модификатора C_m от содержания бария M

мость модификатора при изменении оптимальной концентрации активного элемента.

Второй подход определения эффективности применения модификаторов основан на аксиоме, согласно которой качество продукта $К_п$ определяется через степень соответствия между свойствами продукта и удовлетворяемыми с его помощью потребностями (УП). Обобщенным показателем качества продукта служит соотношение стоимости ($С_п$) и ценности продукта ($Ц_п$) [3]:

$$К = УП = \frac{Ц_п}{С} \to \max. \qquad (2)$$

В настоящее время в работе практически всех чугунолитейных производств прослеживается тенденция к постепенному снижению использования и выводу из производства в качестве графитизирующих модификаторов для внепечной обработки чугуна типовых ферросплавов (например, ФС75, ФС65) с переходом на более сложные сплавы [1] ферросилиция с различными стимулирующими процесс графитообразования добавками бария, кальция, стронция, циркония, РЗМ и др.

Обобщенно показатель работоспособности модификатора сложного состава можно оценить по формуле

$$A_{мод} = K_{в.ф}\, K_{ф.д}\, M_{Si} \sum_{i=1}^{n} K_i^{а} \frac{C_i}{C_0}, \qquad (3)$$

где $A_{мод}$ – показатель эффективности работы модификатора; $K_{в.ф}$ – коэффициент, зависящий от величины фракции модификатора; $K_{ф.д}$ – коэффициент, зависящий от фракционного диапазона модификатора; M_{Si} – доля содержания кремния в модификаторе; $K_i^{а}$ – коэффициент активности i-го элемента в модификаторе; C_i – концентрация i-го элемента в модификаторе; C_0 – предельная концентрация i-го элемента, обеспечивающая максимальную эффективность модификатора.

Таким образом, применительно к модифицирующим материалам показатель качества продукта

$$К_п = УП = \frac{A_{мод}}{С_м} \to max, \quad (4)$$

где $С_м$ – стоимость модификатора.

Из соотношения (4) следует, что для достижения максимального значения показателя качества необходимо следующее:

– увеличение показателя эффективности работы модификатора при сохранении его стоимости;

– снижение стоимости модификатора при неизменном показателе эффективности его работы;

– увеличение показателя эффективности работы модификатора при одновременном снижении его стоимости.

Разработанная методика оценки работоспособности модификатора с показателем его качества была апробирована при испытании графитизирующего модификатора ФС65Ба4 (2...4 % Ba) фракции 1...5 мм на всей номенклатуре отливок из высокопрочного чугуна, получаемых ковшовым модифицированием в чугунолитейном производстве ОАО "АВТОВАЗ".

Цель испытаний – снижение расхода модификатора ФС65Ба4 фракции 1...5 мм по сравнению с модификатором ФС75л6 фракции 3,2...10 мм для первичной ковшовой обработки расплава чугуна. Объектами исследования являлись отливки деталей из высокопрочного чугуна марок ВЧ 50, Gh56-40-05, Gh65-48-05 и Gh75-50-03.

Металлографический анализ микроструктуры отливок выполнен на металлографическом микроскопе UNIMET 8585 фирмы Бюллер (США). Твердость по Бринеллю измеряли по ГОСТ 9013–59 на твердомере ТБ 5006.

Модифицирование проводили согласно действующему технологическому процессу путем размещения навесок модификатора ФС65Ба4 и Ni-Mg-Ce-лигатуры на днище ковша перед его заполнением расплавом чугуна из печи ожидания.

Первичное графитизирующее модифицирование оказывает влияние, главным образом, только на структуру и механические свойства металлической матрицы чугуна и лишь в незначительной степени на степень сфероидизации графита, поэтому действие модификатора на опытно-промышленном этапе оценивали путем анализа твердости по Бринеллю опытных отливок, как компоненты эффективности модифицирования. Отливки для исследований отбирались из первых форм и из форм, залитых через 8 мин с момента замера температуры в процессе разливки ковша.

Нормы расхода серийного (ФС75л6) и опытного (ФС65Ба4) модификаторов, уровень твердости и программа производства всей номенклатуры отливок деталей из высокопрочного чугуна, получаемых ковшовым модифицированием, приведены в табл. 1 и 2.

Принимая во внимание данные табл. 1, вопрос о целесообразности применения модификатора ФС65Ба4 взамен ФС75л6 (частный случай) решается исходя из следующего неравенства:

$$С_м(ФС65Ба4) < kС_м(ФС75л6),$$

где $С_м$(ФС65Ба4), $С_м$(ФС75л6) – стоимость опытного (ФС65Ба4) и серийно применяемого (ФС75л6) модификаторов, руб./т; k – коэффициент разницы расхода серийного и опытного модификаторов. На основании данных суммарного расхода модификаторов (см. табл. 1) определяем коэффициент k:

$$k = \frac{Р_\Sigma(ФС75л6)}{Р_\Sigma(ФС65Ба4)} = \frac{649{,}1246}{429{,}2851} = 1{,}51.$$

В общем виде данное неравенство можно записать следующим образом:

$$С_м(В) < С_м(А)\frac{\sum_{i=1}^{n}\frac{П_i}{K_i}Р(А)_i^к}{\sum_{i=1}^{n}\frac{П_i}{K_i}Р(В)_i^к}, \quad (5)$$

где $С_м$(В), $С_м$(А) – стоимость опытного (В) и серийно применяемого (А) модификаторов, руб./т; K_i – коэффициент вместимости ковша, используемого для заливки i-й отливки; $П_i$ – годовая программа производства i-й отливки, т; $Р(А)_i^к$ – норма расхода на ковш серийного модификатора А для заливки i-й отливки, т; $Р(В)_i^к$ – норма расхода на ковш опытного модификатора В для заливки i-й отливки, т.

Стоимость модификатора и в целом всего процесса модифицирования, если исходить из анализа выражений (3) и (5) есть величина переменная. С позиций экономической целесообразности оптимизация процесса модифицирования не связана однозначно с оптимальным уровнем затрат и может быть даже убыточна при высокой технологической эффективности.

Следовательно, необходимо оценить оптимальный диапазон цены отливки с учетом стоимости процесса модифицирования.

В работе [4] выполнен подробный анализ формирования цены на новую продукцию. В качестве критериев определена цена безубыточности ($Ц_{бу}$) и уровень максимальной прибыли ($Ц_{max}$) нового изделия. Рассмотрим эти критерии.

Цена безубыточности определяется выражением:

$$Ц_{бу} = С_{пер} + \frac{И_{пост}}{Д}, \quad (6)$$

где $С_{пер}$ – переменные издержки на единицу изделия; $И_{пост}$ – постоянные издержки на единицу изделия; Д – объем выпуска продукции.

1. Программа производства отливок деталей из высокопрочного чугуна, получаемого с помощью ковшового модифицирования, нормы расхода модификаторов ФС75л6 и ФС65Ба4

Номер отливки	Деталь	Марка чугуна	Программа на 2006 г.		Расход модификатора			
					ФС75л6		ФС65Ба4*	
			в тоннах	в ковшах (1,2 т)	на ковш, кг	на программу, т	на ковш, кг	на программу, т
1	Вал коленчатый 2101-, 2103-, 21083-, 11183-, 2110-1005020	Gh75-50-03	32495,65	27080	3	81,24	2	54,16
2	Вал коленчатый 1111-, 21213-1005020		1140,14	951	6	5,7	5	4,755
3	Валик привода масляного насоса 2101-1011237	Gh65-48-05	1620,1	1350	8	10,8	5	6,75
4	Кронштейн задней опоры 2121-1001042		133,89	112	15	1,68	10	1,12
5	Звездочка коленчатого вала 2101-1005030		527,48	1759**	1,3	2,2876	0,9	1,5831
6	Маховик 2108-, 2110-1005120	Gh56-40-05	13561,66	11302	7	79,114	6→5***	56,51
7	Суппорт переднего тормоза 2101-3511017		7708,45	6424	13	83,512	9→10	64,24
8	Суппорт переднего тормоза 2108-3511017		2535,58	2113	8	16,904	5	10,565
9	Суппорт переднего тормоза 2110-3511017		3744,58	3121	8	24,968	5	15,605
10	Суппорт переднего тормоза 2121-3511017		2317,55	1932	12	23,184	8	15,456
11	Коробка дифференциала 2108-2303018		6355,11	5296	12	63,552	6→5	26,48
12	Коллектор выпускной 2108-1008025		4765,72	3972	11	43,692	7	27,804
13	Кронштейн переднего моста 2121-2301063		40,91	35	15	0,525	9	0,315
14	Направляющая колодок переднего тормоза 21213-3501155		1191,92	994	15	14,91	11→12	11,928
15	Ступица заднего колеса 2110-3104015		6117,65	5099	12	61,188	8→7	35,693
16	Гайка подшипника коробки дифференциала 2121-2303064		721,87	2407**	5	12,035	4	9,628
17	Картер редуктора заднего моста 2101-2402018	ВЧ 50	5191,86	4327	12	51,924	9→10	43,27
18	Ступица переднего колеса 2101-3103015		3916,87	3265	11	35,915	7	22,855
19	Коллектор выпускной 2123-1008025	ЧВГ 40	6169,98	5142	7	35,994	5→4	20,568
	Всего		100256,97	86681	–	649,1246	–	429,2851

*Фактическое содержание бария в модификаторе – 2,2 %.
**На ковш емкостью 0,3 т.
***Значком "→" показана корректировка расхода модификатора Sibar®22 в зависимости от твердости чугуна.

2. Твердость по Бринеллю отливок из чугуна при модифицировании ФС75л6 и ФС65Ба4

Номер отливки	Деталь	Марка чугуна	Твердость по Бринеллю, НВ		
			Нормируемый диапазон	Диапазон при модифицировании	
				ФС75л6	ФС65Ба4
1	Вал коленчатый 2101-, 2103-, 21083-, 11183-, 2110-1005020	Gh75-50-03	250...302	252...298	255...298
2	Вал коленчатый 1111-, 21213-1005020			257...298	269...278
3	Валик привода масляного насоса 2101-1011237	Gh65-48-05	190...280	191...278	224...278
4	Кронштейн задней опоры 2121-1001042			184...239	255
5	Звездочка коленчатого вала 2101-1005030			180...285	215...226
6	Маховик 2108-, 2110-1005120	Gh56-40-05	180...250	170...269	182...234
7	Суппорт переднего тормоза 2101-3511017			182...278	207...255
8	Суппорт переднего тормоза 2108-3511017			187...266	215...249
9	Суппорт переднего тормоза 2110-3511017			180...266	207...249
10	Суппорт переднего тормоза 2121-3511017			187...249	209...224
11	Коробка дифференциала 2108-2303018			172...278	187...234
12	Коллектор выпускной 2108-1008025			187...249	202...249
13	Кронштейн переднего моста 2121-2301063			189...215	207
14	Направляющая колодок переднего тормоза 21213-3501155			191...275	255...269
15	Ступица заднего колеса 2110-3104015			170...255	177...236
16	Гайка подшипника коробки дифференциала 2121-2303064			187...282	202...222
17	Картер редуктора заднего моста 2101-2402018	ВЧ 50	170...220	170...257	187...249
18	Ступица переднего колеса 2101-3103015		170...210	170...298	172...207
19	Коллектор выпускной 2123-1008025	ЧВГ 40	180...250	172...241	184...217

Уровень максимальной прибыли нового изделия определяется выражением:

$$Ц_{max} = С_{пер} + \frac{И_{пост} + П_{max}}{Д}, \qquad (7)$$

где $П_{max}$ – абсолютное значение прибыли.

Цена безубыточности $Ц_{бу}$ является нижней границей области возможной цены отливки (новой технологии модифицирования), а цена максимальной прибыли $Ц_{max}$ – верхней границей области возможной цены отливки (новой технологии модифицирования). Таким образом, эти два значения цены $Ц_{бу}$ и $Ц_{max}$ являются крайними границами диапазона реальной цены отливки (новой технологии модифицирования).

В применении к процессу модифицирования переменные издержки $С_{пер}$ на единицу изделия, т.е. отливки, определяются стоимостью модификатора $С_м$ в выражении (5).

Следовательно, реальная цена Ц отливки (новой технологии модифицирования) определяется выражением:

$$\left(С_{пер} + \frac{И_{пост}}{Д}\right) \le Ц \le \left(С_{пер} + \frac{И_{пост} + П_{max}}{Д}\right). \qquad (8)$$

В соответствии с выражением (8) цена отливки (новой технологии модифицирования) должна находиться внутри данного диапазона. Если цена окажется меньше цены безубыточности по выражению (6), то решение о постановке данной отливки (новой технологии модифицирования) на серийное производство при имеющихся переменных издержках $С_{пер}$ на одну отливку (способ модифицирования), постоянных издержках $И_{пост}$ и достигнутых объемах производства Д должно быть отрицательным, или должен быть поставлен вопрос о доработке проекта технологии модифицирования.

Экономический анализ необходимо корректировать с учетом оптимизации расхода модификатора,

обеспечивающего работоспособности модифицирования (см. рис. 1), оцениваемого через компоненту эффективности модифицирования, в данном случае твердость по Бринеллю (см. табл. 2). При замене модификатора ФС75л6 на ФС65Ба4 в разы сузился допустимый диапазон колебания твердости, а также произошло повышение минимально допустимого предела и понижение максимально допустимого предела по уровню твердости (см. табл. 2).

Для анализа выберем некоторые отливки (см. табл. 2), для которых характерно значительное колебание твердости, являющееся следствием отсутствия стабильности процесса модифицирования типовым модификатором ФС75л6.

Например, для детали № 5 диапазон твердости при модифицировании ФС75л6 превышает нормируемый диапазон, но диапазон твердости после модифицирования ФС65Ба4 снижен в 9,6 раза при снижении верхнего предела твердости.

Для детали № 13 модифицирование ФС65Ба4 дает полную стабилизацию твердости по всем сечениям отливки, для детали № 18 верхний предел твердости снижен на 91 НВ, что соответствует однородности и стабилизации литой структуры по всем сечениям отливки.

Таким образом, эффективность модифицирования проявляется в уменьшении интервала нормативного диапазона твердости и снижения верхнего нормативного предела по твердости, что в значительной степени улучшит показатели механической обработки.

Вывод

Использование представленных в статье подходов к оценке эффективности применяемых модификаторов, а также зависимостей определения показателей их качества, работоспособности и стоимости позволяет ускорить и упростить процедуру принятия решения о целесообразности применения новых марок модификаторов взамен типовых, а также дает возможность целенаправленно решать вопросы модернизации действующих технологий модифицирования чугуна.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Давыдов С.В., Панов А.Е.** Тенденции развития модификаторов для чугуна и стали // Заготовительные производства в машиностроении. 2007. № 1. С. 3–11.

2. **Усманов Р.Г., Рябчиков И.В., Андреев В.В., Капустина Л.С.** Сравнительные исследования эффективности графитизирующих модификаторов с различным содержанием бария // Литейное производство. 2006. № 4. С. 21–22.

3. **Герасимов Б.И., Злобина Н.В., Спиридонов С.П.** Управление качеством. М.: Кнорус, 2005. 272 с.

4. **Калапуц П.А.** Формирование цен на новую продукцию // Новые технологии. 2006. № 1. С. 21–23.

Денис Алексеевич Болдырев, канд. техн. наук;
Сергей Васильевич Давыдов, д-р техн. наук;
Виталий Михайлович Сканцев, инженер

А.А. Боков, Б.О. Кроль, В.Н. Раздин, Г.С. Теренков
(АМО ЗИЛ, Москва)

Машина сварки трением

Рассмотрен высокопроизводительный и экономичный процесс производства заготовок блока шестерен заднего хода коробки передач сваркой трением.

The article considers the highly productive and saving process of friction welding.

Сварка трением – высокопроизводительный и экономичный процесс соединения деталей из металлов и пластмасс. Благодаря своим достоинствам она находит широкое применение при решении задач экономии металла и создания прогрессивных конструкций в различных отраслях промышленности.

Сварка трением является широкоуниверсальным технологическим процессом и позволяет получать швы высокой прочности и плотности, однородные по качеству.

Для производства заготовок блока шестерен заднего хода коробки передач автомобиля на АМО ЗИЛ была спроектирована и изготовлена машина сварки трением мод. 8381 с площадью сечения в стыке 1000...3000 мм (рис. 1).

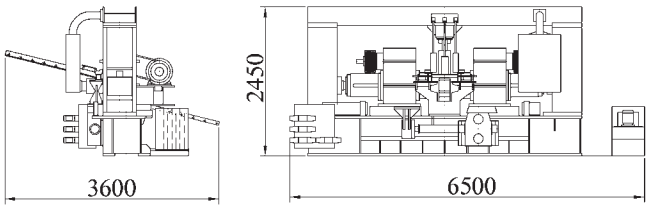

Рис. 1. Общий вид машины сварки трением мод. 8381

Техническая характеристика машины сварки трением мод. 8381

Свариваемая поверхность, мм	2550
Общая длина свариваемой детали, мм	165
Диаметр детали в месте сварки, мм	66
Штучное время, с	45
Сила осадки, кН	450
Ход салазок, мм	128
Частота вращения шпиндельной бабки, мин$^{-1}$	1430
Электродвигатель шпиндельной бабки:	
тип 4А200L4У3, шт	2
мощность, кВт	45
частота вращения, мин$^{-1}$	1475
Гидравлический агрегат:	
давление масла, МПа	12,5
емкость маслобака, л	350
Емкость магазинов загрузки, шт	15
Уровень шума, дБА	60
Установленная мощность, кВт	100
Общая масса, кг	18500

Машина состоит из следующих основных узлов: станины рамной конструкции, подвижных бабок с приводами вращения шпинделей с зажимными патронами, зажимного устройства для центральной части (шейки блока), гидравлических цилиндров для ускоренного и рабочего перемещения бабок, механизма синхронизации перемещения бабок, механизмов загрузки заготовок в рабочую зону и выгрузки изделия после сварки, насосной установки.

На рис. 2 приведены исходные заготовки под сварку и сваренный блок шестерен.

На рис. 3 приведена цикловая диаграмма работы машины. Время цикла $T_ц$ сварки составляет 45 с.

Полуконструктивная схема машины представлена на рис. 4.

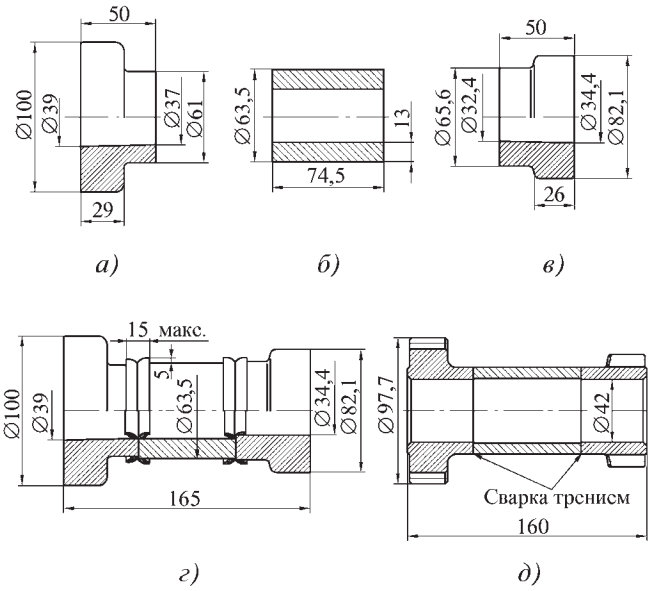

Рис. 2. Заготовки под сварку трением блока шестерен: *а* – большой венец (сталь 20ХГМ); *б* – шейка (труба $\frac{63,5\times13\ ГОСТ\ 8732-78}{В\ 20Х\ ГОСТ\ 8731-74}$); *в* – малый венец (сталь 25ХГМ); *г* – сваренный блок шестерен; *д* – блок шестерен коробки передач

Перемещение всех цилиндров осуществляется от гидравлической насосно-аккумуляторной установки. Крутящий момент передается шпинделям через клиноременную передачу и зубчатую пару при включении муфты и выключении тормоза.

Машина работает следующим образом. После установки всех заготовок на руку загрузочного манипу-

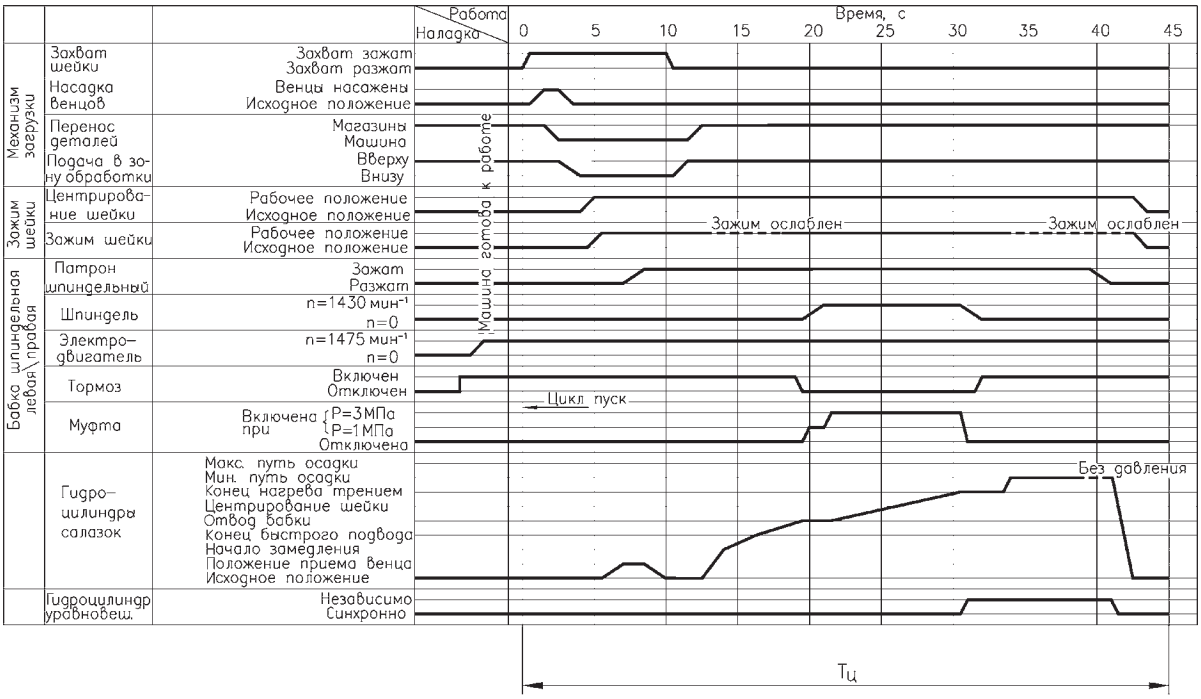

Рис. 3. Циклограмма работы машины сварки трением мод. 8381

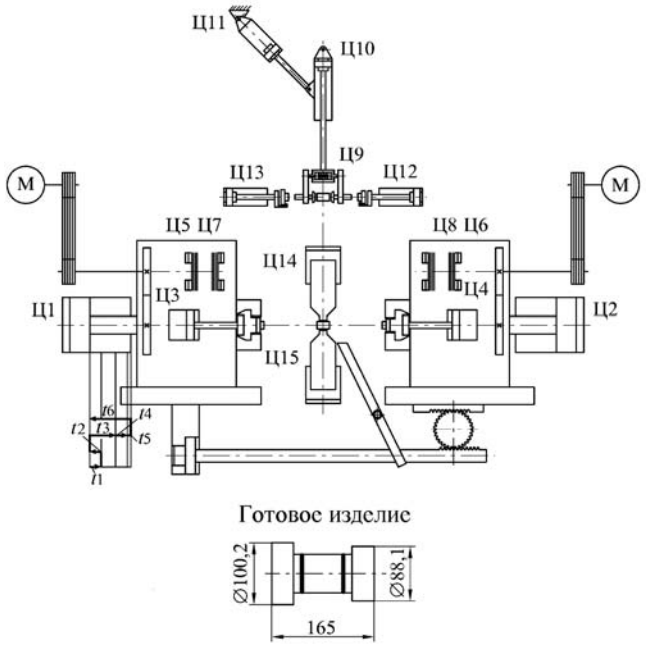

Рис. 4. Полуконструктивная схема машины сварки трением мод. 8381:

Ц1, Ц2 – цилиндр главный, ∅220×128 мм; Ц3, Ц4 – цилиндр патрона шпинделя, ∅215 мм; Ц5, Ц6 – муфта, ∅420×2,75 мм; Ц7, Ц8 – тормоз, ∅420×2,75 мм; Ц9 – цилиндр захвата шейки, ∅20×12 мм; Ц10 – цилиндр загрузки деталей, ∅50×140 мм; Ц11 – цилиндр перемещения деталей, ∅50×63 мм; Ц12, Ц13 – цилиндр насадки венцов, ∅50×63 мм; Ц14, Ц15 – цилиндр зажима шейки, ∅125×22 мм; *t*1 – прием венца; *t*2 – отвод назад; *t*3 – скорый ход; *t*4 – нагрев; *t*5 – осадка; *t*6 – отвод

лятора заготовки перемещаются в рабочую зону машины. Происходит центрирование и зажим средней части (шейки блока). Перемещение шпиндельных бабок для захвата венцов блока осуществляется от гидроцилиндров Ц1 и Ц2 привода салазок шпиндельных бабок. После захвата венцов шпиндельные бабки возвращаются в исходное положение, а рука манипулятора отводится в зону загрузки. Машина готова к началу процесса сварки.

Включаются двигатели вращения шпинделей и от цилиндров Ц1 и Ц2 шпиндельные бабки ускоренно перемещаются к торцам средней части изделия. При недоходе торцов свариваемых частей происходит переключение перемещения шпиндельных бабок на рабочий режим. При фрикционном соприкосновении происходит разогрев свариваемых торцов.

При достижении температуры сварки муфта выключается и включается тормоз. В цилиндры Ц1 и Ц2 подается высокое давление. Включается аккумулятор, который обеспечивает необходимую силу осадки. Синхронизацию перемещения шпиндельных салазок обеспечивает реечно-зубчатый механизм. Зажимные патроны освобождают шейки блока и шпиндельные

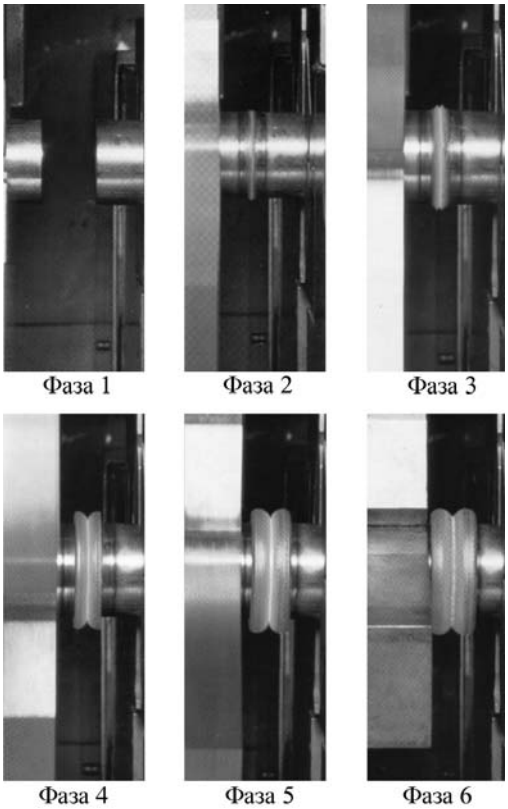

Рис. 5. Фазы сварки трением

бабки возвращаются в исходное положение. Сваренный блок удаляется в тару для готовых изделий. Машина готова к следующему циклу.

Процесс сварки трением состоит из шести фаз (рис. 5):

1. Один компонент вращается и перемещается для контакта с неподвижным.
2. Происходит фрикционный контакт компонентов, при котором снимаются все неровности торцов. Последующий фрикционный контакт увеличивает температуру разогрева до стабильной.
3. В течение этой фазы нагрева излишки металла образуют грат на наружных поверхностях стыка.
4. Образование грата нарастает. Структура металла в стыке становится все более прокованной.
5. Соединение готово для приложения силы осадки.
6. Вращение резко прекращается и необходимой силой осадки обеспечивается надежная сварка по всему сечению с хорошей зернистостью сварного стыка.

Сварка трением требует минимальной подготовки торцов под сварку, нет необходимости предварительного подогрева. Цикл сварки не требует высокой квалификации оператора, контроль за ходом процесса осуществляется автоматически.

Александр Андриянович Боков, канд. техн. наук;
Борис Осипович Кроль, зам. гл. конструктора;
Владимир Николаевич Раздин, начальник КБ;
Григорий Сергеевич Теренков, начальник КБ

А.Е. Балановский *(ЗАО "НПФ Плазмопротек", г. Иркутск)*

Плазменные технологии в промышленности: состояние и перспективы. (*Продолжение*)*

Приведен обзор применяемых в настоящее время в промышленности плазменных технологий резки. Проведено сравнение различных способов и технологий. Даны рекомендации по выбору оптимального оборудования для различных технологических процессов.

The article views different plasma technologies of welding, brazing and cutting. The comparison of different methods is brought. The recommendations on choice of the optimal equipment for the different technological processes are done.

Плазменная резка – самое динамично развивающееся направление в области плазменных технологий. Сегодня это наиболее эффективный способ резки низколегированных и легированных сталей, цветных сплавов с толщиной до 30 мм, в сравнении с газокислородной, лазерной, гидроабразным способами. На рынке сварочного оборудования представлены более 30 типов оборудования для плазменной резки различных производителей. Особенно в области малогабаритных источников тока (30...120 А).

Альтернативой плазменной резки углеродистых и низколегированных сталей остается газокислородная резка, которая, как видно из рис. 7, значительно уступает по скоростным показателям при малых и средних толщинах, а при толщине свыше 60 мм скорости обоих способов резки становятся практически одинаковыми. Предельная скорость газокислородной резки ограничена скоростью окисления, которая для железа не превышает 15...17 мм/с. Плазменная резка имеет только конструктивные ограничения. В последние годы все чаще стали использовать смеси газов (аргон + водород, азот + кислород). Исследования, проведенные К.В. Васильевым, Броунингом, Северентом, Велсом, доказали, что добавка в азотную плазму кислорода в пределах 25...70 % позволяет увеличить скорость резки на 50...60 % (рис. 8).

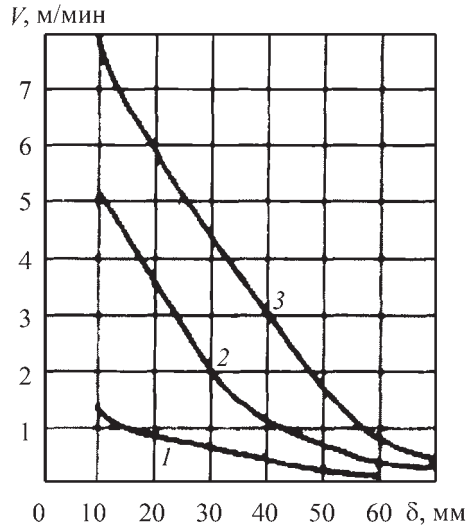

Рис. 7. Сравнение скоростей резки металла:
1 – газокислородная резка; *2* – плазменная резка с воздушным охлаждением плазмотронов; *3* – плазменная резка с водяным охлаждением плазмотронов

Увеличение производительности плазменно-кислородной резки по сравнению с плазменной связано с эндотермической реакцией в плазме дуги. Среди эндотермических реакций в плазме дуги главное место занимает реакция окисления азота, содержащегося в смеси с кислородом [7, 8], с выходом оксида азота NO, возрастающим с увеличением температуры, давления и соотношения между азотом и кислородом в исходной смеси. Наибольшие выход и концентрация оксида азота в плазменной дуге достигаются при содержании кислорода в исходной смеси 60...70 % [7]. В условиях резки азотно-кислородный поток плазмы с таким содержанием NO взаимодействует с железом по реакции $2Fe + 2NO = 2FeO + N_2$.

Даже небольшие концентрации NO уже вызывают сильное окисление железа. По данным В.В. Фролова,

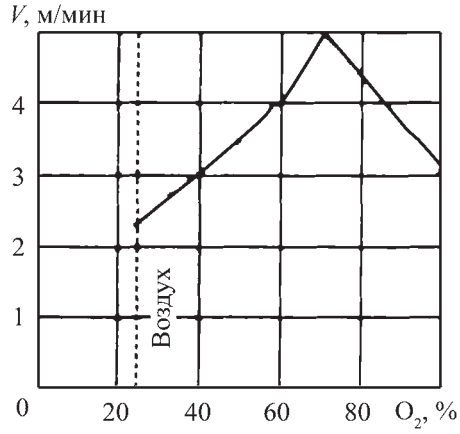

Рис. 8. Влияние концентрации кислорода в плазменной дуге на скорость резки

*Начало см. № 6, 2007 г.

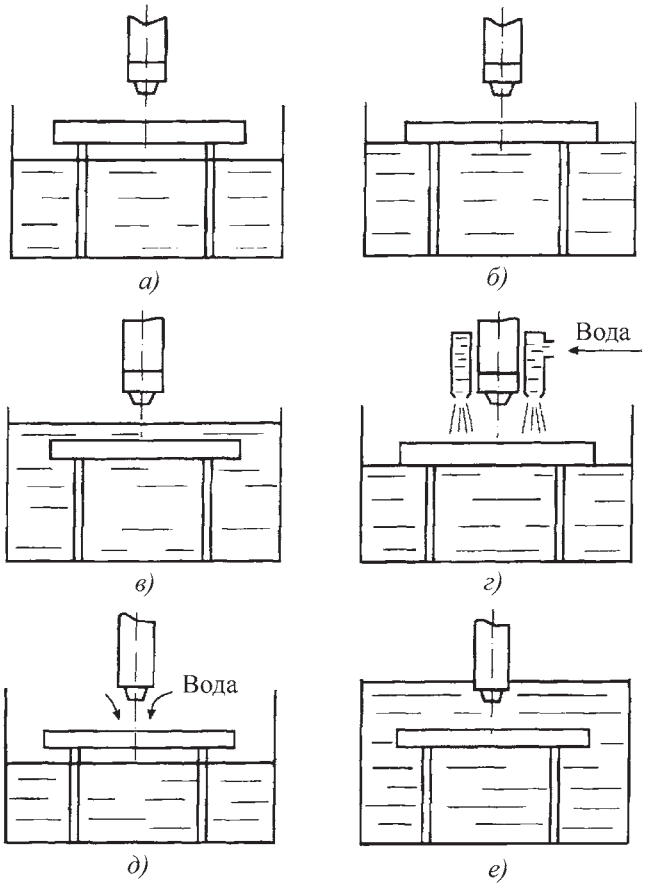

Рис. 9. Схемы способов плазменной резки с водяной защитой

оксид азота по отношению к железу является более активным окислителем, чем чистый кислород.

Таким образом, в отличие от газоплазменной кислородной резки (при которой разбавление кислорода азотом уменьшает количество необходимых для реакции столкновений частиц железа и кислорода) при плазменно-дуговой резке в азотно-кислородных смесях эффективны столкновения с частицами железа не только частиц кислорода, но и (в большей степени) частиц оксида азота, что интенсифицирует окисление железа, даже при небольшом содержании кислорода в плазме. Механизм горения железа при резке стали в азотно-кислородных смесях К.В. Васильев предложил назвать нитрооксидным [9], что позволяет объяснить все характерные особенности резки в азотно-кислородной плазме. Сдерживающим фактором в применении резки в азотно-кислородных смесях является потребность в двух источниках газа и повышенный расход сопел и катодов.

В последние годы значительно вырос интерес к технологии плазменной резки с использованием водяной защиты. Многие авторы [5] отмечали, что эта технология на порядок улучшает санитарно-гигиенические нормы, способствует снижению остаточной деформации и др.

Основные схемы воздушно-плазменной резки с водяной защитой приведены на рис. 9 [5]. При всех

1. Режимы машинной воздушно-плазменной резки малоуглеродистых и низколегированных сталей

Толщина металла, мм	Напряжение на дуге, В	Сила тока, А	Скорость резки, см/с		
			обычной	над водой	над водой с водяной завесой
10	155...160	200	4,0	3,8	3,8
	165...170	300	6,8	6,5	6,1
	175...180	400	7,8	7,8	7,4
20	155...160	200	1,9	1,7	1,8
	165...170	300	3,4	3,1	2,9
	175...180	400	4,1	3,7	3,5
30	155...160	200	1,0	0,85	0,8
	165...170	300	2,0	1,7	1,6
	175...180	400	2,6	2,2	2,0
40	155...160	200	0,7	0,6	0,56
	165...170	300	1,2	1,0	0,95
	175...180	400	1,4	1,2	1,1
50	155...160	200	0,5	0,42	0,4
	165...170	300	0,7	0,6	0,56
	175...180	400	1,0	0,85	0,8

вариантах резки вредные выделения поглощаются водой. Наибольшее промышленное применение получили способы резки, показанные на рис. 9, *в*. Режимы обычной плазменной резки и резки с водяной защитой представлены в табл. 1.

Резка с водяной защитой отличается большой склонностью к образованию грата по сравнению с обычной (кроме схемы на рис. 9, *а*). В целях устранения этого недостатка скорость резки уменьшают. Важным преимуществом плазменной резки с водяной защитой является уменьшение ширины реза на 15...30 % по сравнению с обычной плазменной резкой.

Механические способы резки тонколистовой низкоуглеродистой стали, особенно по криволинейному контуру, достаточно трудоемки и требуют специального оборудования, а газокислородная резка вызывает значительные деформации. Для этих целей достаточно эффективной является так называемая микроплазменная резка с использованием воздуха или кислорода. При этом используют специальные плазмотроны, обеспечивающие устойчивое горение малоамперной дуги. Рекомендуемые режимы микроплазменной резки малоуглеродистых сталей приведены в табл. 2. Резку сталей толщиной, указанной в табл. 2, можно выполнять на больших токах и с более высокими скоростями, используя сопла диаметром 1,5...2 мм, но при этом ширина реза несколько возрастает [5].

2. Режимы микроплазменной резки малоуглеродистой стали

Толщина металла, мм	Расход воздуха, л/мин	Диаметр сопла, мм	Сила тока, А	Напряжение, В	Скорость резки, см/с	Ширина реза, мм
1...3	10	0,8	30	130	5...8,3	1...1,3
3...5	12	1,0	50	110	3,4...5	1,6...1,8
5...7	15	1,4	75	110	2,5...3,3	1,8...2
7...10	15	1,4	100	120	1,7...2,5	2...2,5

Перспективным направлением совершенствования микроплазменной резки считается использование плазмотронов с диаметром сопла 0,3 мм, имеющих вихревую и магнитную стабилизацию и использующих в качестве плазмообразующего газа чистый кислород. Немаловажным фактором при плазменной резке является качество реза, которое характеризуется величиной грата, отклонениями от перпендикулярности реза, шероховатостью, зоной термического влияния. При плазменной резке величина грата значительно ниже, чем при газокислородной резке сопоставимых толщин углеродистой стали. В то же время такие технологические факторы, как скорость резки, расход плазмообразующего газа, дистанция обработки оказывают значительное влияние на величину грата.

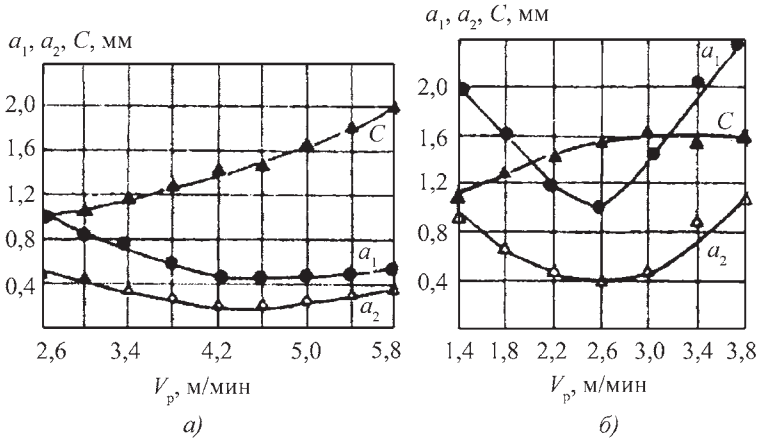

Рис. 10. Зависимость ширины a_1 и высоты a_2 грата и неперпендикулярности поверхности реза C от скорости резки $V_р$ металла толщиной 6 (*а*) и 10 (*б*) мм

Грат, образующийся при пониженных скоростях резки, легко удаляется с кромок реза. Удаление грата, образующегося при повышенных скоростях, является более трудоемкой операцией. На практике сталкиваются с проблемой грата при работе на максимальных скоростях резки. На рис. 10 показано влияние скорости воздушно-плазменной резки стали Ст3сп толщиной 6 и 10 мм на размеры грата (ширину a_1 и высоту a_2). Эти данные подтверждают факт существенного влияния скорости резки на величину грата, причем с увеличением толщины металла скорость резки, при которой величина грата минимальна, уменьшается. Размер грата минимален при расходе плазмообразующего воздуха 70...80 л/мин. С уменьшением расхода величина грата возрастает, что можно объяснить ослаблением механического воздействия плазменного потока на нижнюю кромку листа.

Повышенное гратообразование наблюдается и при увеличении расстояния от плазмотрона до поверхности листа, особенно когда процесс резки осуществляют на скоростях, близких к предельно допустимым. Это происходит при резке листов, не подвергнутых предварительной правке либо имеющих остаточные деформации, возникшие в процессе обработки. В этих случаях применение автоматических устройств, поддерживающих расстояние между плазмотроном и разрезаемым листом, является обязательным. Использование в качестве плазмообразующего газа кислорода взамен воздуха способствует уменьшению размеров грата. Это подтверждают данные, приведенные в табл. 3.

Резка с водяной защитой отличается большей склонностью к образованию грата на кромках заготовок по сравнению с обычной воздушно-плазменной резкой. Для подавления процесса образования грата скорость резки при использовании водяной защиты снижают на 5...20 % (см. рис. 9, *б*, *в*), а в отдельных случаях – на 40...50 % (см. рис. 9, *г*).

При плазменной резке ширина реза у верхних кромок больше, чем у нижних. С увеличением степени сжатия плазмы и уменьшением диаметра сопла плазмотрона уменьшается разница между шириной реза по толщине металла и неперпендикулярностью кромок. Величина неперпендикулярности кромок при плазменной резке представляет собой половину разницы ширины реза в верхней и нижней плоскостях разрезаемого листа. Наибольшее отклонение поверхности реза от перпендикулярности регламентировано ГОСТ 14792–80 в зависимости от толщины разрезаемого металла (табл. 4, 5, 6).

Скорость плазменной резки при прочих равных условиях оказывает существенное влияние на ширину реза и неперпендикулярность кромок. При увеличении скорости реза от 6,3 до 9,6 см/с (толщина листа 6 мм) величина неперпендикулярности поверхности реза составляет соответственно 1,6 и 2 мм, что нахо-

3. Режимы чистовой резки и качество реза при воздушно-плазменной резке углеродистой стали

Способ резки	Толщина металла, мм	Режимы резки				Параметры реза			
		Сила тока резки, А	Диаметр сопла, мм	Скорость резки, см/с	Напряжение на дуге, В	Ширина реза, мм		Непер-пендику-лярность, мм	Высота грата, мм
						Верхняя кромка	Нижняя кромка		
Воздушно-плазменная	3	60...65	1,2	3,33	110...115	1,8	1,5	0,15	1,1
				4,14		1,8	1,4	0,20	0,9
				5,00		1,6	1,1	0,30	0,3
				5,83		1,6	1,0	0,30	0,5
Воздушно-плазменная с погружением листа в воду	3	60...65	1,2	3,33	110...115	1,7	1,4	0,15	1,6
				4,14		1,7	1,4	0,15	0,8
				5,00		1,5	1,2	0,15	0,5
				5,83		1,3	1,0	0,15	0,9
Кислородно-плазменная	3	60...65	1,2	3,33	110...115	2,0	1,8	0,10	0,6
				4,14		1,8	1,5	0,15	0,5
				5,00		1,7	1,4	0,15	0,2
				5,83		1,6	1,3	0,15	0,2
						1,3	1,0	0,15	0,3
Кислородно-плазменная с погружением листа в воду	3	60...65	1,2	3,33	110...115	1,8	1,6	0,10	0,8
				4,14		1,4	1,2	0,10	0,5
				5,00		1,4	1,1	0,15	0,3
				5,83		1,3	1,0	0,15	0,6
Воздушно-плазменная	6	90...100	1,5	2,59	120...130	2,6	1,7	0,45	1,0
				3,33		2,5	1,5	0,50	0,2
				4,16		2,4	1,2	0,60	0,8
Воздушно-плазменная с погружением листа в воду	6	90...100	1,5	2,59	120...130	2,2	1,5	0,35	0,3
				3,33		2,1	1,3	0,40	0,5
				4,16		2,0	1,1	0,45	1,0
Кислородно-плазменная	6	90...100	1,5	2,59	120...130	2,8	2,5	0,15	0,6
				3,33		2,8	2,2	0,30	0,3
				4,16		2,6	1,6	0,50	0,2
				5,00		2,5	1,3	0,60	0,3
Кислородно-плазменная с погружением листа в воду	6	90...100	1,5	2,59	120...130	2,3	2,0	0,15	1,0
				3,33		2,2	1,8	0,20	0,5
				4,16		2,1	1,3	0,40	0,4
									0,5
									1,2
Воздушно-плазменная	10	270...280	3,0	2,50	135...140	5,2	2,2	1,5	1,2
				3,33		5,2	1,8	2,6	0,6
				4,16		5,1	1,1	2,0	0,5
				5,00		5,0	0,8	2,2	1,1
				5,83		4,9	0,7	2,1	1,2

Способ резки	Толщина металла, мм	Режимы резки				Параметры реза			
		Сила тока резки, А	Диаметр сопла, мм	Скорость резки, см/с	Напряжение на дуге, В	Ширина реза, мм		Неперпендикулярность, мм	Высота грата, мм
						Верхняя кромка	Нижняя кромка		
Воздушно-плазменная с погружением листа в воду	10	270...280	3,0	2,50	135...140	4,6	2,0	1,3	0,5
				3,33		4,5	1,7	1,4	0,4
				4,16		4,5	1,1	1,7	0,2
				5,00		4,3	0,7	1,8	0,2
				5,83		4,3	0,7	1,8	0,6
Кислородно-плазменная	10	270...280	3,0	2,50	135...140	9,3	3,0	1,1	0,5
				3,33		9,2	2,6	1,3	0,4
				4,16		5,0	2,2	1,4	0,2
				5,00		5,0	1,8	1,6	0,2
				5,83		5,0	1,6	1,7	0,6

4. Допустимые отклонения перпендикулярности реза при машинной вырезке деталей по ГОСТ 14792–80, мм

Класс	Способ резки	Нормы при толщине разрезаемого металла, мм			
		5...12	13...30	31...60	61...100
I	Кислородная	0,2	0,3	0,4	0,5
	Плазменно-дуговая	0,4	0,5	0,7	–
II	Кислородная	0,5	0,7	1,0	1,5
	Плазменно-дуговая	1,0	1,2	1,6	–
III	Кислородная	1,0	1,5	2,0	2,5
	Плазменно-дуговая	2,3	3,0	4,0	–

дится в пределах третьего класса (см. табл. 4). С увеличением расстояния от среза сопла до плоскости листа неперпендикулярность тоже возрастает.

Неперпендикулярность реза заметно ниже при кислородно-плазменной резке, в том числе с погружением листов в воду (см. табл. 3). Сравнение воздушно-плазменной резки листов толщиной 6...10 мм с кислородно-плазменной в варианте использования водяной защиты позволяет сделать вывод о том, что в последнем случае качество реза по параметру неперпендикулярности соответствует первому и второму классам по ГОСТ 14792–80 (см. табл. 4).

Для кромок, подлежащих сварке и механической обработке, а также для поверхности фасок допускается шероховатость не ниже третьего класса. Немаловажную роль при внедрении плазменной резки играют санитарно-гигиенические характеристики, такие как выделение аэрозоля, высокочастотный шум в комбинации с ультразвуком, электромагнитное излучение оптического диапазона (ультрафиолет, видимый и инфракрасный спектр) и ионизация воздуха. Особую опасность представляет аэрозоль, твердая составляющая которого состоит из соединений обрабатываемых материалов, а газовая – из оксидов азота и озона. Использование водяной защиты позволяет радикально улучшить санитарно-гигиенические характеристики процесса.

Содержание вредных веществ в воздухе в зоне дыхания резчика при воздушно-плазменной резке с водяной защитой в несколько раз ниже, чем при обычной и находится в пределах допустимых норм (табл. 7).

При резке с водяной защитой нет необходимости в использовании дополнительных вентиляционных систем.

Основным источником шума и ультразвука при плазменной резке является плазмотрон. Установлено, что суммарные уровни шума и ультразвука на расстоянии 0,25 м от плазмотрона составляют 105...115 дБА, на расстоянии 1 м уменьшаются на 8...10, 2 м – на 13 и 3 м – на 15...16 дБА.

Уровень шума зависит от конструкции плазмотрона, режима резки, давления плазмообразующего газа и других факторов, но практически всегда выходит за пределы допустимых норм, которые составляют 80 дБ.

Спектрограммы уровней звуковой мощности показывают, что шум имеет широкополосный характер с концентрацией основной энергии в области высокочастотных звуковых и низкочастотных ультразвуковых колебаний (4000...40000 Гц), т.е. включает весь слышимый диапазон частот и переходит в ультразвуковую область.

Замеры показали, что суммарный уровень шума при обычной воздушно-плазменной резке превышает

5. Зависимость ширины реза и скоса от скорости плазменной резки, расхода газа и воды

Вариант	Плазмообразующая среда	Расход газа, л/с	Расход воды, л/с	Сила тока, А	Напряжение, В	Скорость резки, мм/с	Ширина реза, мм		Средняя величина скоса, мм	Наличие грата
							по верхней кромке	по нижней кромке		
I	Воздух + вода	1,30	0,005...0,0057	280	160	16,7	6,0	4,0	1,00	Легкий грат
					155	33,0	5,2	2,6	1,30	Отдельные капли
					150	50,0	5,0	2,0	1,50	Грат средней величины
	Кислород + вода	1,50	0,003...0,0033	270	150	16,7	8,0	6,2	0,90	Следы грата
					145	33,0	6,1	4,0	1,05	
					140	50,0	6,1	3,0	1,55	
II	Воздух + вода	0,83	0,005...0,0057	280	145	36,7	5,5	2,5	1,50	Легкий грат
		1,33			150		5,3	2,5	1,40	Отдельные капли
		2,00			155		5,0	2,6	1,20	То же
	Кислород + вода	0,92	0,003...0,0033	270	135	36,7	6,1	2,6	1,75	Следы грата
		1,50			140		6,0	3,5	1,25	
		2,20			150		5,5	3,1	1,20	
III	Воздух + вода	1,33	0,0017	280	150	36,7	5,2	2,5	1,35	Следы грата
			0,005		150		5,0		1,25	То же
			0,0083		155		5,0		1,25	Грат средней величины
	Кислород + вода	1,50	0,0017	270	145	36,7	6,1	3,1	1,50	Следы грата
			0,0033		148		6,0	3,0	1,50	
			0,01147		150		6,0	3,2	1,40	

6. Допустимые значения шероховатости реза по ГОСТ 14792–80, мм

Класс	Способ резки	Нормы при толщине разрезаемого металла, мм			
		5...12	13...30	31...60	61...100
I	Кислородная	0,050	0,060	0,070	0,085
	Плазменно-дуговая	0,050	0,060	0,070	–
II	Кислородная	0,080	0,160	0,250	0,500
	Плазменно-дуговая	0,100	0,200	0,320	–
III	Кислородная	1,160	0,250	0,500	1,00
	Плазменно-дуговая	0,200	0,320	0,630	–

норму на 25...30 дБА, при резке листов, касающихся поверхности воды, – на 19...20 дБА, а при дополнительном использовании водяной завесы – на 10...12 дБА.

Только при резке с погружением плазмотрона и разрезаемого листа в воду на глубину 30...50 мм суммарный уровень шума находится в пределах допустимых норм: 80...82 дБА.

В спектре электромагнитных излучений плазменной дуги преобладают ультрафиолетовые (0,2...0,4 мкм) и инфракрасные (0,76...3,50 мкм) диапазоны. Наибольшую интенсивность ультрафиолетового излучения 7,5 Вт/м^2 отмечают при 0,22...0,29 мкм, что превышает допустимый уровень оптической облученности рабочего места в этом диапазоне частот на несколько порядков. Интенсивность инфракрасного излучения плазмы на расстоянии 0,5 м от среза сопла плазмотрона не превышает 1,4 кВт/м^2, однако тепловое излучение от нагрева металла составляет 3,5 кВт/м^2. Ионизирующий эффект плазмы и ультрафиолетового излучения опреде-

7. Содержание вредных веществ в рабочей зоне при воздушно-плазменной резке

Способ резки	Режим резки		Концентрация, мг/м^3		
	Режущий ток, А	Напряжение на дуге, В	Аэрозоля	Оксида азота	Озона
Обычная воздушно-плазменная резка	300	180	3,0...5,5	1,8...3,4	0,15...0,25
Воздушно-плазменная резка с водяной защитой	300	180	1,2...2,5	0,5...1,5	0,05...0,07

Примечание. Предельно-допустимая концентрация для аэрозоля, оксида азота и озона составляет соответственно: 4; 2 и 0,1 мг/м^3.

ляет высокие концентрации аэроионов: 1,1...108 эл. заряд/см^3 тяжелых положительно заряженных ионов и 6,0...108 эл. заряд/см^3 отрицательных.

Использование водяной защиты, особенно технологии резки с погружением листов и плазмотрона в воду, позволяет практически полностью устранить вредное влияние электромагнитных излучений, ионизирующего эффекта и ультрафиолетового излучения плазмы на обслуживающий персонал.

Поскольку при резке с водяной защитой основные вредные вещества поглощаются водой, то представляет интерес оценка качества самой воды после такой обработки. В производственных условиях провели отбор проб воды из раскроечного стола-ванны после двух месяцев интенсивной эксплуатации, где воду не меняли, а пополняли по мере испарения. Определяли следующие показатели воды: наличие взвешенных веществ, концентрацию водородных ионов, общую жесткость, состав осадка [5].

Проба воды, взятая из раскроечного стола-ванны, после воздушно-плазменной резки малоуглеродистых сталей содержала хлопья, видимые взвешенные вещества, которые после отстоя в течение 30 мин осаждались на дно колбы. Осадок представлял собой обыкновенный шлам, в состав которого входили соли и оксиды железа (до 98 %), кальция и марганца. Результаты проведенного анализа показали, что основные показатели пробы воды не отличаются от аналогичных характеристик, присущих технической воде, и соответствуют требованиям ГОСТ Р 52407–2005. После механической фильтрации осадка вода пригодна к повторному использованию. Таким образом, наличие оборотной системы, оснащенной циркуляционным насосом и соответствующим фильтром, гарантирует экологическую чистоту процесса воздушно-плазменной резки и водяной защитой.

В ограниченных рамках данной статьи невозможно рассмотреть все аспекты плазменной резки, которые можно взять из специальной литературы [3–6] и рекламных проспектов известных фирм-производителей, таких как ESAB, Lincoln Electric, СЭЛМА и др. Дальнейшее развитие плазменной резки прогнозируют в следующих направлениях:

- резка металлов больших толщин (до 200 мм и более);
- подводная плазменная резка на глубинах до 30 м и более;
- автоматизированная резка металлов малых и средних толщин;
- роботизированная резка в условиях повышенной радиации и глубокого вакуума;
- разработка плазмотронов с высокой концентрацией энергии в столбе дуги при минимальном энергопотреблении;
- совершенствование гибридных систем резки (плазма + лазер, плазма + гидроабразивная резка, плазменно-детонационная резка).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Патон Б.Е.** Плазменные технологии на рубеже веков // Автоматическая сварка. 2000. № 2. С. 3–6.
2. **Балановский А.Е.** Развитие плазменной технологии: сварка, наплавка, упрочнение, резка // Сварка в Сибири. 1999. № 2. С. 8–19.
3. **Эсибян Э.М., Гладкий П.В., Никифоров Н.И. и др.** Оборудование для плазменной сварки, наплавки, резки // Машиностроение: Энциклопедия. Т. IV-6: Оборудование для сварки. М.: Машиностроение, 1999. С. 369–375.
4. **Эсибян Э.М.** Воздушно-плазменная резка // Автоматическая сварка. 2000. № 12. С. 6–18.
5. **Лащенко Г.И.** Обеспечение точности изготовления сварных конструкций // Сварщик. 2003. № 3. С. 17–21.
6. **Михайлов Б.И.** Электродуговые генераторы пароводяной плазмы // Теплофизика и аэромеханика. 2002. Т. 9. № 4. С. 597–612.
7. **Васильев К.В.** Особенности плазменно-дуговой сварки в азотно-кислородных смесях (обзор) // Автоматическая сварка. 2000. № 12. С. 21–25.
8. **Патон Б.Е., Гвоздецкий В.С., Дудко Д.А. и др.** Микроплазменная сварка. Киев: Наук. Думка, 1979. 248 с.
9. **Нефедов Б.Б., Лялякин В.П.** Развитие плазменной сварки и наплавки за рубежом // Сварочное производство. 1998. № 3. С. 21–27.
10. **Переплетчиков Е.Ф.** Плазменная наплавка // Сварщик. 2000. № 2. С. 8–11.

Александр Евгеньевич Балановский, канд. техн. наук

УДК 621.981.1.011.001.24

И.В. Ткачёв
(Воронежский государственный технический университет)

Влияние формы потери устойчивости заготовок на технологические возможности гибки на валковых машинах

Исследованы условия потери устойчивости листовых заготовок при гибке крупногабаритных обечаек на валковых машинах. Рассмотрены особенности образования пластических шарниров с учетом остаточных напряжений для трех типов потери устойчивости заготовок. Проведены эксперименты, показавшие сходимость с расчетными данными.

The article investigates the stability loss conditions of sheet samples in the process of large sized vessels bending on roller-bending machines. Peculiarities of plastic hinges forming with taking into account remaining tensions for the 3 types of stability loss for samples resistance. Experiments were carried out manifesting similarity with the predicted data.

Основной элемент аппаратов химического и нефтяного машиностроения – обечайку изготовляют гибкой листового материала на валковых машинах. Технологические возможности валковых машин определяют по паспорту в зависимости от ширины и толщины изгибаемого листового материала, а также минимального радиуса гибки. Однако при гибке обечаек крупногабаритной аппаратуры возникает нарушение заданной конфигурации заготовки под действием собственной массы (потеря устойчивости).

Условия потери устойчивости заготовки в процессе гибки определяются во многом числом, расположением и направлением перемещения валков. Наибольшее распространение получили трехвалковые машины (рис. 1, *а*) с симметричным расположением боковых приводных валков относительно верхнего. В большинстве конструкций деформация заготовки производится верхним нажимным валком, в некоторых – за счет перемещения боковых.

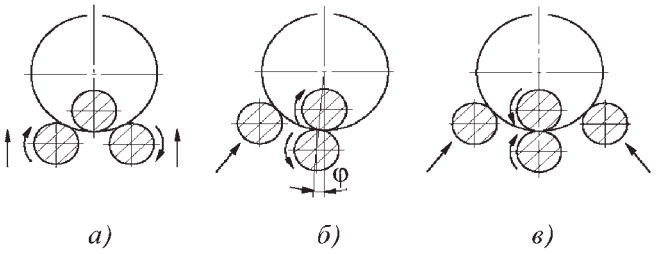

Рис. 1. Схема валковых машин:
а – симметричная трехвалковая; *б* – асимметричная трехвалковая; *в* – четырехвалковая

В последнее время получили распространение трехвалковые асимметричные машины со смещением нижнего валка относительно верхнего (рис. 1, *б*). Для гибки толстолистового материала применяют четырехвалковые машины (рис. 1, *в*) с верхним и нижним приводами. Деформация заготовки осуществляется верхним и боковыми валками, которые при регулировке перемещаются под углом $\varphi = 25...40°$ к вертикали. Последняя схема сочетает элементы симметричной и асимметричной трехвалковой машины.

Можно выделить три типа потери устойчивости заготовки (рис. 2): тип I – уменьшение кривизны отформованной заготовки, миновавшей зону деформации в валках, с последующим падением листа (положение заготовки AB_1); тип II – увеличение кривизны заготовки, отформованной более чем на половину окружности (положение заготовки OB_1); тип III – увеличение кривизны заготовки после прохождения поддерживающего ролика, устанавливаемого в некоторых конструкциях машин для предотвращения потери устойчивости (положение O_1B_1).

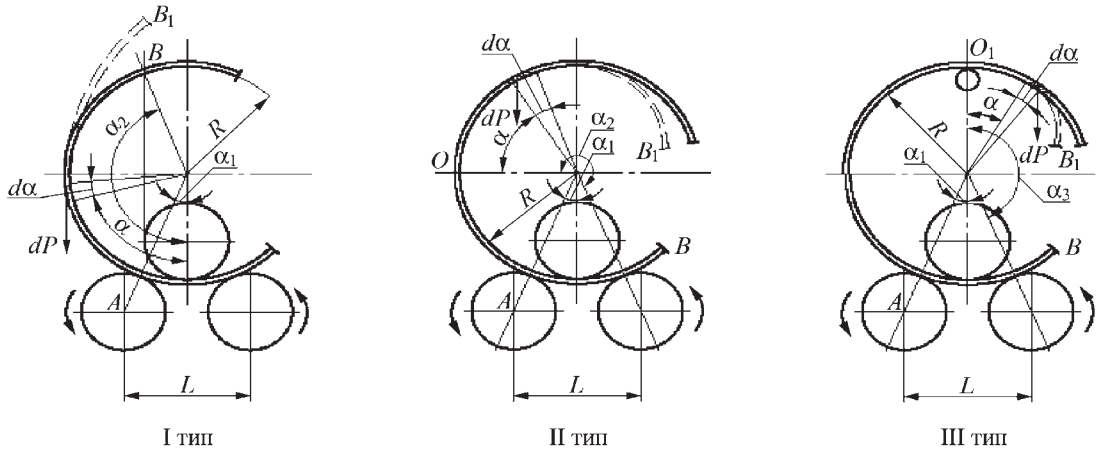

Рис. 2. Различные типы потери устойчивости заготовки

Для оценки устойчивости обечайки в процессе гибки в валковых машинах предложено эмпирическое выражение [1]

$$\frac{2{,}3D^2}{10^6 h} \le 1, \qquad (1)$$

где $D = 2R$ – диаметр заготовки, мм; R – радиус заготовки; h – толщина заготовки, мм.

При выполнении условия (1) заготовка сохраняет устойчивость. Однако зависимость (1) не отражает конструктивных особенностей валковых машин и механических характеристик материала листа.

Рассмотрим условия, при которых возникает потеря устойчивости заготовки применительно к основным типам валковых машин.

При гибке в симметричной трехвалковой машине заготовки радиусом R из листового материала плотностью γ, толщиной h возможность потери устойчивости типа I сохраняется в области от точки A до точки B, координаты которых определяются соответственно углами α_1 и α_2 (см. рис. 2, тип I).

Элементарная сила, возникающая в заготовке единичной ширины,

$$dP = Rh\gamma\, d\alpha$$

создает элементарный изгибающий момент

$$dM = R^2 h\gamma(\sin\alpha - \sin\alpha_1)d\alpha. \qquad (2)$$

Интегрируя выражение (2) в пределах от α_1 до α_2, получаем

$$M = R^2 h\gamma[\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2 - (\alpha_2 - \alpha_1)\sin\alpha_1].$$

Максимальный изгибающий момент для симметричных машин соответствует углу $\alpha_2 = 180° - \alpha_1$:

$$M_{\max} = R^2 h\gamma[2\cos\alpha_1 - (\pi - 2\alpha_1)\sin\alpha_1]. \qquad (3)$$

Из анализа кинематических схем асимметричных трехвалковых и четырехвалковых машин (см. рис. 1, *б* и *в*) очевидно, что условие потери устойчивости заготовки типа I для них аналогично.

При потере устойчивости заготовки типа II максимальный изгибающий момент возникает в точке O (см. рис. 2, тип II) от формирования заготовки на угол α_2. У симметричных трехвалковых и четырехвалковых машин угол $\alpha_2 = 270° - \alpha_1$. В соответствии с изложенной выше методикой

$$M_{\max} = R^2 h\gamma(1{,}5\pi - \alpha_1 + \cos\alpha_1). \qquad (4)$$

В конструкции асимметричных трехвалковых машин нижний валок расположен под углом φ относительно центра заготовки (см. рис. 1, *б*). Следовательно, $\alpha_2 = 270° + \varphi$ и

$$M_{\max} = R^2 h\gamma(1{,}5\pi - \alpha_1 + \cos\varphi). \qquad (5)$$

При потере устойчивости типа III максимальный изгибающий момент, рассчитанный относительно точки расположения поддерживающего ролика при формовании заготовки на угол $\alpha_3 = 180° - \alpha_1$ (см. рис. 2, III),

$$M_{\max} = R^2 h\gamma(1 + \cos\alpha_1).$$

Потеря устойчивости обечайки при гибке на валковых машинах происходит вследствие образования пластического шарнира в опасном сечении заготовки. Процессы образования пластического шарнира при потере устойчивости типа I и типов II и III несколько различаются, что объясняется эффектом Баушингера и наличием остаточных напряжений.

При потере устойчивости типа I происходит уменьшение кривизны заготовки, и деформация от собственной массы заготовки имеет знак, обратный знаку деформации при ее изгибе. Добавочные напряжения $\sigma_д$ накладываются на остаточные напряжения,

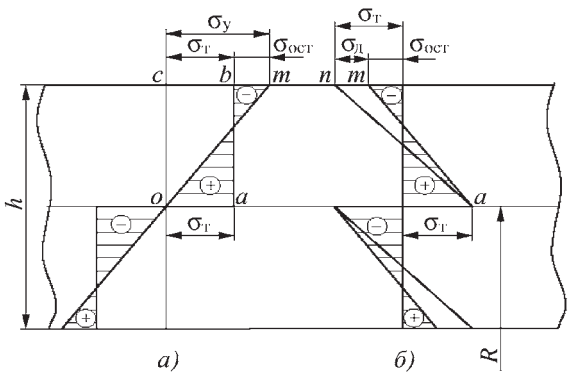

Рис. 3. Распределение напряжений по толщине заготовки при потере устойчивости типа I:
а – при изгибе с пружинением; *б* – при разгрузке

появившиеся в материале от изгиба и последующего пружинения заготовки.

Характер распределений напряжений в случае линейной схемы чисто пластической стадии изгиба полосовой заготовки из неупрочняющего материала [2] показан на рис. 3: по всему сечению напряжения равны пределу текучести $\sigma_т$ (линия *oabc*).

Изгибающий момент при нагружении для заготовки единичной ширины

$$M_н = \frac{\sigma_т h^2}{4}. \qquad (6)$$

Снятие нагрузки при пружинении заготовки происходит по упругому закону (линия *om*); момент разгрузки

$$M_р = \frac{\sigma_у h^2}{6},$$

где $\sigma_у$ – напряжение упругой разгрузки.

Из равенства моментов нагрузки и разгрузки получаем

$$\sigma_у = 1{,}5\sigma_т .$$

В результате наложения эпюр нагрузки и разгрузки возникают остаточные напряжения (заштрихованная часть эпюры на рис. 3, *а*), значение которых в крайних волокнах $\sigma_{ост} = 0{,}5\sigma_т$, а знак будет обратным знаку напряжений нагрузки. Отметим, что при гибке листового материала напряжения возрастут в 1,15 раза.

Добавочные напряжения, как указано выше, накладываются на остаточные, причем их суммарное значение в крайних волокнах не должно превышать предела текучести

$$\sigma_д = 0{,}5\sigma_т .$$

Разгибка (разгрузка) (см. рис. 3, *б*) происходит по упругому закону, поэтому линия *an* будет прямой и добавочный момент разгибки:

$$M_д = \frac{\sigma_т h^2}{12}.$$

Характер распределения напряжений для остальных типов потери устойчивости аналогичен характеру распределения напряжений при нагружении для потери устойчивости типа I. При последующем нагружении происходит образование пластического шарнира и изгибающий момент достигает значения, рассчитываемого по формуле (6).

Следовательно, за критерий сохранения обечайкой единичной ширины заданного радиуса кривизны следует принять следующие соотношения:

при потере устойчивости типа I

$$M_{max} \le \frac{\sigma_т h^2}{12}; \qquad (7)$$

при потере устойчивости типов II и III

$$M_{max} \le \frac{\sigma_т h^2}{4}. \qquad (8)$$

Получить аналитическую зависимость для расчета наибольшего радиуса гибки заготовки на основании предельных условий сохранения заданного радиуса кривизны и выражений (3)–(5) для максимальных значений и изгибающих моментов при различных типах потери устойчивости не представляется возможным, так как в выражения (3)–(5) входит угол α_1, зависящий от радиуса гибки [2].

В результате совместного решения уравнений (3) и (7), (4) и (8), (5) и (8) построены номограммы (рис. 4) для определения наибольших радиусов R_{max} гибки

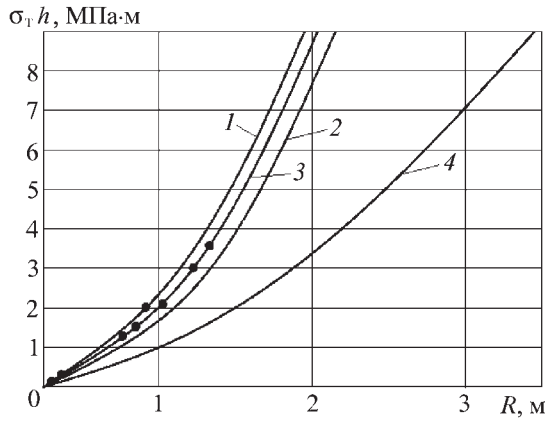

Рис. 4. Номограмма для определения наибольшего радиуса гибки заготовки:
1 – расчет по эмпирической зависимости; *2*, *3*, *4* – расчет по предлагаемой методике при потере устойчивости типа I, II и III соответственно; • – экспериментальные данные

листов заготовки в зависимости от ее толщины h и предела текучести материала $\sigma_т$. Например, для заготовки с $h = 20$ мм и $\sigma_т = 250$ МПа по номограмме получаем $R_{max} = 1{,}55$ м при условии потери устойчивости типа II; при установке поддерживающего ролика радиус гибки увеличивается до $R_{max} = 2{,}55$ м.

Из анализа номограммы следует, что при гибке обечаек на валковых машинах наиболее реально потеря устойчивости типа II. Установка поддерживающего ролика в значительной степени расширяет диапазон наибольших допустимых радиусов гибки.

Проведена серия экспериментов по определению наибольших радиусов гибки заготовок из листовой прокатной стали Ст3 в диапазоне малых и средних значений показателя $\sigma_т h$($\sigma_т$ = 236...312 МПа; h = = 2,4...6 мм). Гибку полос шириной, равной 20 толщинам, производили на трехвалковой машине, настроенной на достижении заданного радиуса за один проход. Радиус гибки определяли прогибомером с базой 100 мм и индикатором часового типа. Фиксировали потерю устойчивости заготовки типов I и II.

Исследования показали, что возникновение пластических деформаций в опасном сечении заготовки с последующей потерей устойчивости зависит в основном от механических свойств материала и толщины листа. Как видно из рис. 4, данные эксперимента удовлетворительно совпадают с данными расчетов по предлагаемой методике и эмпирической зависимости (1) для условий потери устойчивости типов I и II. Следует отметить, что расчет по эмпирической зависимости значительно сужает диапазон наибольших радиусов гибки и не отражает запаса устойчивости от установки на валковых машинах поддерживающего ролика.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Берлинер Ю.Н., Балашов Ю.А.** Технология химического и нефтяного машиностроения. М.: Машиностроение, 1976. 256 с.

2. **Унксов Е.П., Джонсон У., Овчинников А.Г. и др.** Теория ковки и штамповки / 2-е изд. перераб. М.: Машиностроение, 1992. 718 с.

Игорь Викторович Ткачёв, канд. техн. наук

УДК 621.979.134:001.891

Н.В. Петров, С.Н. Злобин
(Орловский государственный технический университет)

Математическая модель процессов в кривошипном прессе с гидродемпфером

Разработана математическая модель процессов в кривошипном прессе с гидродемпфером, позволяющая исследовать влияние основных параметров гидродемпфера на динамические характеристики кривошипного пресса при выполнении разделительных операций.

The mathematical model of the processes taking place in a crank press with hydrodampfer is developed. That model allows to research the agency of the basic hydrodampfer parameters on the dynamic characteristics of a crank press by during cutting operations.

Разделительные операции на кривошипных прессах сопровождаются динамическими нагрузками, вызванными упругой разгрузкой деталей пресса после скола заготовки, величина которых в ряде случаев превышает технологические силы в несколько раз, что приводит к разрушению деталей пресса и ухудшает качество получаемых изделий.

Для снижения динамических нагрузок, возникающих в кривошипных прессах при выполнении разделительных операций, предлагается использовать демпфирующее устройство (гидродемпфер) [1]. Гидродемпфер представляет собой цилиндр, в корпус которого вмонтирован дроссель, выполненный в виде шайбы с круглым отверстием и острой кромкой. Схема кривошипного пресса с гидродемпфером приведена на рис. 1.

Гидродемпфер работает следующим образом.

При холостом движении ползуна *7* вниз поршень гидродемпфера *6* вытесняет жидкость из полости *A* в гидравлический аккумулятор *5*. Давление жидкости в полости *A* гидродемпфера *6* повышается пропорционально скорости перемещения вниз поршня гидро-

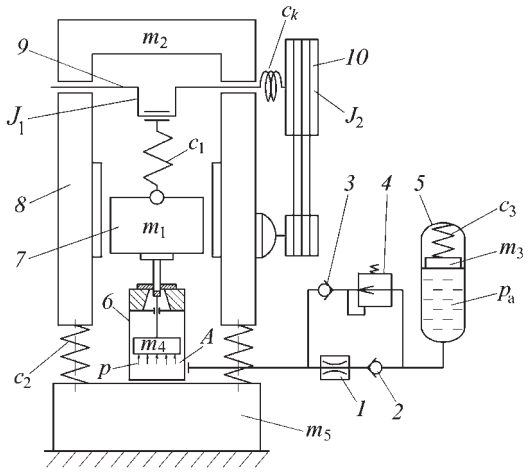

Рис. 1. Расчетная схема кривошипного пресса с гидродемпфером: *1* – дроссель; *2*, *3* – обратные клапаны; *4* – редукционный клапан; *5* – гидравлический аккумулятор; *6* – гидродемпфер; *7* – ползун; *8* – станина; *9* – кривошипный вал; *10* – маховик

демпфера за счет сжатия жидкости и сопротивления истечению жидкости, направляемой через дроссель *1* и обратный клапан *2* в гидравлический аккумулятор *5*.

Сопротивление истечению жидкости через дроссель при обычных скоростях ползуна вблизи крайнего нижнего положения мало, однако при выполнении разделительных операций после скола заготовки эта скорость значительно возрастает. В этом случае сопротивление истечению жидкости через дроссель *1* становится настолько большим, что позволяет эффективно гасить динамические колебания конструкции пресса, возникающие после скола заготовки. Это предотвращает поломку деталей пресса и повышает его долговечность при разделительных операциях.

При ходе ползуна *7* вверх давление жидкости в полости *A* начинает понижаться. При равенстве давления в полости *A* гидродемпфера и аккумуляторе обратный клапан *2* закрывается и расход через дроссель становится равным нулю. При дальнейшем перемещении ползуна *7* вверх открывается обратный клапан *3* и жидкость из аккумулятора *5* начинает вытесняться через редукционный *4* и обратный *3* клапаны в полость *A* гидродемпфера. Жидкость из аккумулятора вытесняется до тех пор, пока давление жидкости в полости *A* гидродемпфера не достигнет давления настройки редукционного клапана *4*. За счет энергии жидкости, подаваемой в полость *A* гидравлическим аккумулятором, поршень и шток гидродемпфера перемещаются вверх вслед за ползуном. Таким образом, гидродемпфер восстанавливает свое первоначальное состояние.

Для расчета основных параметров гидродемпфера разработана математическая модель, описывающая динамические процессы, происходящие в кривошипном прессе при выполнении разделительных операций. При разработке математической модели процессов в кривошипном прессе с гидродемпфером (см. рис. 1) были приняты следующие допущения:

– масса станины условно разбита на две части: нижнюю m_5, которая принимается неподвижной и в расчете не учитывается, и верхнюю m_2 с приведенной к ней массой привода;

– масса шатуна распределена между массами ползуна m_1 и верхней частью станины m_2;

– поступательное движение масс модели, связанных с прессом, принято состоящим из двух движений: переносного S, обусловленного кинематикой исполнительного механизма пресса, и относительного x_i, налагаемого малыми перемещениями, вызванными упругими деформациями деталей пресса;

– упругие деформации деталей пресса сосредоточены в шатуне, стойках станины и кривошипном валу;

– зазоры в исполнительном механизме сосредоточены в сопряжении шатуна с ползуном, при этом приведенный зазор равен суммарному зазору в сопряжениях звеньев исполнительного механизма;

– утечки жидкости и потери давления на трение в магистралях гидравлической системы гидродемпфера отсутствуют.

При составлении математической модели направленные вниз перемещения и силы принимаются положительными. Рассматривается только фаза работы демпфирующей системы, при которой рабочая жидкость вытесняется из гидродемпфера в аккумулятор.

При принятых допущениях процессы в прессе в этой фазе работы описываются системой дифференциальных уравнений первого порядка, включающей в себя уравнения движения ползуна, станины, поршня аккумулятора, кривошипного вала, маховика, уравнения изменения давления рабочей жидкости в цилиндрах гидродемпфера и аккумулятора и уравнения связи скоростей и перемещений:

$$\left.\begin{aligned}
&(m_1+m_4)\left(\frac{d\mathrm{v}}{dt}+\frac{d\mathrm{v}_1}{dt}\right)=P_1-P_d+(R_1+R_2)\mathrm{sign}(\mathrm{v}_1)+\\
&\qquad\qquad +G_1+G_4-pF;\\
&m_2\frac{d\mathrm{v}_2}{dt}=c_2x_2-\mu_2\mathrm{v}_2-P_1+G_2;\\
&m_3\frac{d\mathrm{v}_3}{dt}=c_3(x_0+x_3)+R_3\mathrm{sign}(\mathrm{v}_3)+G_3-p_\mathrm{a}F_\mathrm{a};\\
&J_1\frac{d\omega_1}{dt}=-c_k(\alpha_1-\alpha_2)+P_1m_k;\\
&J_2\frac{d\omega_2}{dt}=c_k(\alpha_1-\alpha_2);\\
&\frac{dp}{dt}=\beta_1[F(\mathrm{v}-(\mathrm{v}_1+\mathrm{v}_2))-q];\\
&\frac{dp_\mathrm{a}}{dt}=\beta_2(q-F_\mathrm{a}\mathrm{v}_3);\\
&\frac{dS}{dt}=\mathrm{v};\ \frac{dx_1}{dt}=\mathrm{v}_1;\ \frac{dx_2}{dt}=\mathrm{v}_2;\ \frac{dx_3}{dt}=\mathrm{v}_3;\\
&\frac{d\alpha_1}{dt}=\omega_1;\ \frac{d\alpha_2}{dt}=\omega_2,
\end{aligned}\right\}\quad(1)$$

где m_1, G_1 – масса и сила тяжести ползуна с частью шатуна; m_2, G_2 – масса и сила тяжести верхней части станины с приводом, кривошипным валом и частью шатуна; m_3, G_3 – масса и сила тяжести поршня аккумулятора; m_4, G_4 – масса и сила тяжести поршня и штока гидродемпфера; P_1 – сила упругости, действующая на ползун со стороны шатуна; c_1, c_2 – коэффициенты жесткости упругих связей "ползун – верхняя часть станины" и "верхняя часть станины – стол пресса" соответственно; c_3 – коэффициент жесткости пружины аккумулятора; c_k – коэффициент крутильной жесткости кривошипного вала; x_1, v_1, x_2, v_2 – перемещения и скорости масс m_1 и m_2 от положения равновесия, вызванные деформациями упругих связей c_1 и c_2; x_3, v_3 – перемещение и скорость поршня аккумулятора; x_0 – предварительная деформация пружины; α_1, α_2, ω_1, ω_2 – углы поворота и угловые скорости кривошипа и маховика привода соответственно, вызванные упругой деформацией кривошипного вала; $S = R\left[(\cos\alpha - \cos\alpha_0) + \frac{\lambda}{4}(\cos 2\alpha - \cos 2\alpha_0)\right]$ – перемещение ползуна [2]; R – радиус кривошипа кривошипного вала; λ – коэффициент шатуна; $\alpha = \alpha_0 - \omega_н t - \omega_1 t$ – текущее значение угла поворота кривошипа; α_0 – угол поворота кривошипного вала в момент контакта пуансона с заготовкой; $\omega_н$ – номинальная угловая скорость вращения кривошипного вала; $m_k = R\left(\sin\alpha + \frac{\lambda}{2}\sin 2\alpha\right) + m_k^{\mu}$ – приведенное плечо крутящего момента [2]; m_k^{μ} – приведенное плечо сил трения; t – время движения частей пресса; v – скорость ползуна; P_d – сила сопротивления деформации вырубаемого материала; R_1 – сила трения в рабочих частях штампа и направляющих ползуна; R_2 – сила трения в уплотнениях гидродемпфера; R_3 – сила трения в уплотнениях аккумулятора; μ_2 – коэффициент вязкого сопротивления, учитывающий демпфирование колебаний станины; J_1 – момент инерции кривошипного вала; J_2 – момент инерции маховика; β_1, β_2 – коэффициенты жесткости магистралей гидродемпфера и аккумулятора соответственно; $q = \mu f\sqrt{\frac{2(p - p_а)}{\rho}}$ – расход жидкости через дроссель; p – давление жидкости в полости гидродемпфера; $p_а$ – давление жидкости в аккумуляторе; F – площадь поршня гидродемпфера; $F_а$ – площадь поршня аккумулятора; μ – коэффициент расхода; f – площадь отверстия дросселя; ρ – плотность жидкости.

В отличие от существующих методик расчета, где принято, что разгрузка кривошипного пресса происходит мгновенно, предлагается сопротивление деформации P_d листового металла при вырубке принять в виде аналитического выражения с учетом переменного сопротивления срезу в зависимости от пластических свойств вырубаемого материала и глубины внедрения пуансона (рис. 2) [2, 3].

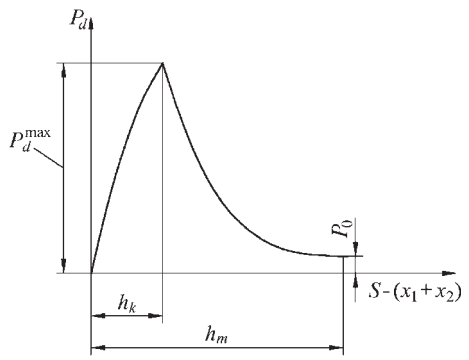

Рис. 2. График сопротивления деформации при вырубке-пробивке листового металла

Восходящая часть графика описывается выражением

$$P_d = k_1 L h_m \sigma_{ср}^x, \qquad (2)$$

где k_1 – коэффициент, учитывающий затупление инструмента, колебание толщины и механических свойств материала; L – периметр вырубаемого изделия; h_m – толщина вырубаемого материала; $\sigma_{ср}^x$ – текущее сопротивление срезу, меняющееся в зависимости от глубины внедрения пуансона

$$\sigma_{ср}^x = \frac{S_k}{2 - 0{,}95\psi_k}\frac{\psi}{\psi_k}\left(1{,}03 - \frac{0{,}9\psi}{1{,}9 - \psi}\right), \qquad (3)$$

где ψ – относительное сужение поперечного сечения при вырубке-пробивке; ψ_k – относительное сужение при стандартных испытаниях на разрыв [2].

Для материалов с равномерным относительным сужением $\psi_р \le 0{,}15$

$$S_k = \sigma_в(1 + 1{,}35\psi_k).$$

Для материалов с $\psi_р > 0{,}15$

$$S_k = \sigma_в(0{,}8 + 2{,}06\psi_k),$$

где $\sigma_в$ – предел прочности металла при растяжении.

Путь пуансона до начала разрушения металла при вырубке

$$h_k = S - (x_1 + x_2) = h_m\left(\frac{0{,}9\psi_k}{1{,}9 - \psi_k}\right),$$

где $S = R\left[(\cos\alpha - \cos\alpha_0) + \frac{\lambda}{4}(\cos 2\alpha - \cos 2\alpha_0)\right]$ – перемещение ползуна [2].

В формуле (3) ψ изменяется от 0 до ψ_k. При $\psi = \psi_k$ по выражению (2) $P_d = P_d^{max}$, т.е. максимальному сопротивлению деформации вырубаемого материала.

Участок графика P_d при снижении нагрузки во время скола материала при вырубке (см. рис. 2) наиболее точно описывается функцией [3]:

$$P_d = P_0 + a\left[\frac{h_m - (S - (x_1 + x_2))}{h_m - h_k}\right]^b, \qquad (4)$$

где P_0 – сила проталкивания пуансона после вырубки; $a = P_d^{\max} - P_0$; $b = (1 - k_2)/k_2$; k_2 – коэффициент заполнения графика рабочей нагрузки на участке скола [2].

Из-за наличия зазоров в исполнительном механизме характеристика жесткости упругой связи "ползун–кривошип" кусочно-линейная и состоит из трех участков. Зазоры в сопряжениях при работе пресса постоянно выбраны уравновешивателем в направлении действия технологической силы, вследствие чего характеристика жесткости связи c_1 смещена относительно оси ординат на величину суммарного зазора z_c. Условия перехода от одного участка характеристики к другому можно записать следующим образом:

$$\text{при } x_1 - x_2 \geq 0,\ c_1 = c_{1\text{c}}; \qquad (5)$$

$$\text{при } -z_c \leq x_1 - x_2 < 0,\ c_1 = 0; \qquad (6)$$

$$\text{при } x_1 - x_2 < -z_c,\ c_1 = c_{1\text{p}}. \qquad (7)$$

При этом коэффициент жесткости исполнительного механизма при сжатии $c_{1\text{c}}$ отличается от коэффициента жесткости при растяжении $c_{1\text{p}}$, причем $c_{1\text{c}} > c_{1\text{p}}$.

Таким образом, решение системы уравнений (1) проводится по участкам, в пределах которых коэффициент жесткости c_1 имеет постоянное значение. Учитывая участок нарастания технологической нагрузки на ползуне, получаем четыре расчетных участка.

Участок 1: $(S - (x_1 + x_2)) \leq h_k$.

Нарастание технологической силы на ползуне.

При этом: $c_1 = c_{1\text{c}}$; сила упругости, действующая на ползун со стороны шатуна, $P_1 = c_1(x_1 - x_2)$; сила сопротивления деформации P_d определяется по формуле (2).

Участок 2: $x_1 - x_2 \geq 0$, $h_k < (S - (x_1 + x_2)) \leq h_m$.

Разгрузка исполнительного механизма до начала пересопряжения зазоров.

При этом: $c_1 = c_{1\text{c}}$; сила упругости, действующая на ползун со стороны шатуна $P_1 = c_1(x_1 - x_2)$; сила сопротивления деформации P_d определяется по формуле (4).

Участок 3: $-z_c \leq x_1 - x_2 < 0$, $(S - (x_1 + x_2)) > h_m$.

Пересопряжение зазора в исполнительном механизме.

При этом: $c_1 = 0$; сила упругости, действующая на ползун со стороны шатуна, $P_1 = 0$; сила сопротивления деформации $P_d = P_0$.

Участок 4: $x_1 - x_2 < -z_c$, $(S - (x_1 + x_2)) > h_m$.

Восстановление силового контакта в динамической системе и нагружение исполнительного механизма растягивающей силой.

При этом: $c_1 = c_{1\text{p}}$; сила упругости, действующая на ползун со стороны шатуна, уменьшается за счет того, что деформации x_1 и x_2 во время пересопряжения зазора z_c переходят в зазор: $P_1 = c_1(x_1 - x_2 - z_c)$; сила сопротивления деформации $P_d = P_0$.

Решая систему уравнений (1), можно исследовать влияние основных параметров гидродемпфера на динамические характеристики пресса и определить оптимальные значения этих параметров.

Использование сопротивления деформации P_d в виде аналитического выражения при решении предлагаемой математической модели процессов в кривошипном прессе при вырубке позволит исследовать влияние на эти процессы пластических свойств и толщины вырубаемого материала, повысить точность получаемых результатов расчета, дать рекомендации по настройке дросселя.

Предлагаемая конструкция гидродемпфера с рассчитанными оптимальными параметрами обеспечит возможность выполнения на кривошипных листоштамповочных или другого технологического назначения прессах разделительных операций с резким снижением рабочей нагрузки с силой, близкой к номинальной без возникновения при этом опасных динамических явлений.

Работа выполнена в соответствии с программой "Развитие научного потенциала высшей школы", финансируемой Министерством образования и науки Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пат. 2252143** Российская Федерация, МПК[7], B 30 B 15/28. Демпфирующее устройство к прессу / Злобин С.Н.; заявитель и патентообладатель Орловский государственный технический университет. № 2004103650/02; заявл. 09.02.2004; опубл. 20.05.2005, Бюл. № 14.

2. **Ланской Е.Н.** Элементы расчета деталей и узлов кривошипных прессов / Е.Н. Ланской, А.Н. Банкетов. М.: Машиностроение, 1966. С. 89–92.

3. **Петров Н.В.** Разработка математической модели процессов в кривошипном прессе при разделительных операциях / Н.В. Петров, С.Н. Злобин // Изв. ТулГУ. Сер. "Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением". Вып. 1. Тула: ТулГУ, 2003. С. 172–176.

Николай Владимирович Петров, канд. техн. наук;
Сергей Николаевич Злобин, ст. преподаватель

В.Г. Ковалёв *(МГТУ им. Н.Э. Баумана),*
А.В. Рыбаков *(Московский государственный технологический университет "Станкин")*

Автоматизация проектирования технологических процессов листовой штамповки. Часть 2. Примеры проектирования*

Рассмотрены основы создания системы автоматизированной поддержки информационных решений (САПИР), предназначенной для автоматизации процесса проектирования штампов холодной листовой штамповки (ЛШ) в компьютерной среде. Отличительной особенностью САПИР ЛШ от традиционных систем автоматизированного проектирования штампов является ее ориентированность на специалиста предметной области как в эксплуатации, так и на этапах разработки. Проектирование опирается на известные технические решения, содержащиеся более чем в 200 ГОСТ, ОСТ, РТМ, справочниках по штамповке и составляющих компьютерную базу знаний. Графические задачи решаются с помощью параметрического автоматизированного проектирования и черчения T-FLEX CAD 2D.

The article considers the basics of creating of CAD/CAM/CAE system for designing cold sheet stamps.

Во второй части статьи представлены возможности системы автоматизированного проектирования инженерных решений (САПИР) и ее пользовательский интерфейс на примере проектирования штампов листовой штамповки (ЛШ). Отличительной особенностью САПИР от традиционных САПР является ее изначальная ориентированность на специалиста предметной области, но не программиста. Этап внесения изменений в правила проектирования конкретного объекта предусмотрен заранее и доступен конструктору в ходе эксплуатации системы.

В состав САПИР входят: инвариантная информационная платформа для решения машиностроительных задач в интерактивном режиме, символьная и графическая базы знаний объектов проектирования, которые являются ее функциональным наполнением, и связывающая их в единое целое библиотека сценариев проектирования.

В качестве такой инвариантной платформы используется интегрированная интеллектуальная система (ИнИС). Для разработки и внесения изменений в символьные базы знаний используются инструментальные средства, называемые интеллектуальной компьютерной средой (ИКС). Для разработки и внесения изменений в графические базы знаний и оформления комплекта конструкторской документации (КД) на объект проектирования используется система параметрического автоматизированного проектирования и черчения T-FLEX CAD.

Сама САПИР работает в среде Windows 95/98/NT/2000/XP и имеет традиционный для данных систем интерфейс: диалоговые окна, пиктограммы, встроенную систему подсказок, справочную систему и др. Причем пользователь может ознакомиться с системой не только на уровне функций-подсказок и слайдов технических решений, но и на уровне понятийной модели, баз данных с нормативно-справочной информацией, параметрических прототипов чертежей, библиотеки сценариев проектирования и др.

Для пользователя САПИР представляет собой функциональный набор процедур, которые в рамках создаваемого проекта реализуют сценарий, направленный на проектирование того или иного типа штампа, используя прототип или "базовую модель", основанную на известных разработках. В общем случае прототип с точки зрения процесса проектирования штампов ЛШ – это конструкция штампа, проверенная на стадиях проектирования, изготовления и эксплуатации и ставшая образцом ("базовой моделью") для последующих конструкторских разработок. Прототип включает в себя различные варианты компоновки, присущие данной конструкции штампа. Например, при проектировании последовательного штампа в зависимости от формы штампуемой детали и желания пользователя возможно использование различных фиксирующих элементов: упоров шаговых и разовых, ножей шаговых, боковых прижимов, фиксаторов и др.

Такая конструкция штампа легко привязывается пользователем к особенностям конкретного производства как по конфигурации деталей штампа, так и по их составу, используя стандартные и нестандартные решения (например, форма плит блока штампа, наличие пуансонодержателя, форма пуансонов и др.). Так проектируется основная номенклатура штампов ЛШ машино- и приборостроительного производства, что позволяет:

- сократить в 2–3 раза трудоемкость проектных расчетов, конструирования и выпуска рабочих чертежей штампов ЛШ;
- повысить качество проектных работ за счет сокращения ошибок проектирования;
- сократить на порядок сроки подготовки технической документации;

*Начало см. № 4, 6, 2007 г.

Рис. 8. Виды деятельности, претерпевшие наиболее существенные изменения при использовании компьютерного моделирования в машиностроении

• значительно сократить сроки освоения выпуска новых изделий.

Объектом проектирования САПИР/ЛШ являются разделительные, формообразующие и комбинированные штампы ЛШ, для получения деталей произвольной конфигурации из различных материалов толщиной до 10 мм и размерами до 1000 мм.

Одновременно с чисто конструкторскими задачами в САПИР/ЛШ решаются и технологические вопросы, влияющие на проектирование штампов. К ним относятся: проверка штампуемой детали на технологичность, раскрой, расчет развертки гнутой детали, расчет количества переходов и размеров полуфабрикатов при вытяжке цилиндрических стаканов и др. Например, анализ на технологичность гнутых деталей позволяет выбирать типовые конструкции штампов, обеспечивающие получение качественных деталей в зависимости от их габаритов, точности и толщины штампуемого материала.

Выбор CAD/CAE/CAM-системы для проектирования. Ядро программно-методического комплекса современного производящего предприятия (КБ + завод) составляют CAD/CAE/CAM-системы (рис. 8).

Наиболее наукоемкой частью CAD/CAE/CAM-систем является трехмерная графика (3D графика). Ключевым элементом 3D графики выступает параметризованная объектно-ориентированная система геометрического моделирования, обеспечивающая легкость в обращении и гибкость в работе программы, возможность фиксации ассоциативных связей между отдельными элементами конструкции, стандартные интерфейсы для выполнения инженерных расчетов и реализации процессов изготовления.

Необходимый набор компонентов, включаемых в CAD/CAE/CAM-системы, приведен на рис. 9.

Этот базовый набор дополняется различными вспомогательными модулями, расширяющими возможности систем. Очень часто в состав универсальных систем входят широко известные специализированные пакеты, такие как MoldFlow, AutoForm, NASTRAN, PAN Stamp и др.

Набор программных продуктов, входящих в состав CAD/CAE/CAM-систем, прекрасно вписывается в существующую структуру предприятий. Это связано с тем, что, с одной стороны, целые группы продуктов из общего набора являются достаточно универсальными и используются как в основном цикле, так и во вспомогательных производствах (системы трехмерного геометрического моделирования, чертежно-графические и т.п.). С другой стороны, специализированные программные продукты (расчетные программы, технологические модули и т.п.) соответствуют потребностям конкретных подразделений предприятий.

2. Трехмерное геометрическое моделирование (CAD)

2.1. Графическое 2-х и 3- мерное ядро (Parasolid, Axis, Granite и др.)

2.2. Базовый набор трехмерных операций

2.3. Средства оформления чертежей по стандартам (ЕСКД, ISO, ANSI и др.)

2.4. Параметризация (D-CUBED, T-FLEX и др.)

2.5. Работа с произвольными поверхностями

2.6. Простота обучения и эксплуатации

3. Функциональные модули

3.1. Метод конечных элементов (МКЭ) для прочностного, теплового и других анализов

3.2. Проектирование оснастки (штампы, пресс-формы, режущий и измерительный инструмент и др.)

3.3. Инженерные расчеты (CAE)

3.4. Моделирование кинематики и динамики механизмов

3.5. Работа с «тонким листом металла»

4. Технологическая подготовка производства (CAM)

4.1. Подготовка управляющих программ для оборудования с ЧПУ

4.2. Виды обработки:
- фрезерная;
- токарная;
- электроэрозионная;
- гравировка

4.3. Обслуживание контрольно-измерительных машин

4.4. Моделирование обработки на оборудовании с ЧПУ

4.5. Генерация постпроцессоров

4.6. Реализация высокоскоростной обработки

6. CASE - средства

6.1. Создание прикладных приложений пользователя

6.2. Построение пользовательского интерфейса

6.3. Объектно-ориентированная технология обработки

6.4. Интерфейсы с другими CAD/CAE/CAM-системами

1. Управление жизненным циклом изделия (PLM)

1.1. Управление коллективной работой

1.2. Работа в сети Internet

5. СУБД

5.1. Каталоги нормализованных элементов

Рис. 9. Состав компонентов CAD/CAE/CAM-систем

На всех этапах работ единым источником данных для инженерных приложений выступает цифровая модель, построенная на единой структурированной основе средствами систем управления базами данных (СУБД). При работе с системой должно обеспечиваться контролируемое автоматическое перенесение изменений в какой-либо области конструкторской разработки на все соответствующие участки полного проекта.

Интегрированная компьютерная технология допускает стыковку с системами управления деятельностью промышленного предприятия, что еще более повышает эффективность автоматизации рабочих процессов.

Следует также отметить, что бóльшая часть CAD/CAE/CAM-систем близки по своим функциональным возможностям.

Собственно создание штамповой оснастки основано на выполнении следующей цепочки действий:

1) определение исходных требований к описанию штампуемой детали;

2) выполнение технологических расчетов, подтверждающих возможность получения детали с помощью операций штамповки;

3) получение комплекта конструкторско-технологической документации, позволяющей изготовлять штампы в промышленных условиях;

4) изготовление штампа в "металле".

Внешнее окружение процесса проектирования технологической оснастки с использованием САПИР приведено на рис. 10.

В САПИР деятельность исполнителя по формированию рабочих элементов штампа представляется в виде деловых процессов, использующих табличные, алгоритмические и геометрические зависимости между входными данными и параметрами (рис. 11). Алгоритмы определяются прочностными зависимостями либо получаются путем аппроксимации соответствующих табличных зависимостей из нормативно-справочной информации. Подобные деловые процессы в САПИР обычно обслуживают проекты, связанные с созданием штампов одного назначения: последовательные, совмещенные, гибочные, вытяжные и т.п.

Задача проектирования конструкции штампа для исполнителя в САПИР обычно связана со следующими действиями: 1) анализ исходной заготовки; 2) выбор на этой основе прототипа конструкции; 3) проведение технологических расчетов; 4) формирование оригинальных узлов конструкции; 5) выпуск комплекта конструкторско-технологической документации на изготовление и сборку.

Примерная схема проектных работ в САПИР штампов может быть представлена в виде следующей цепочки действий.

1. На основе исходного чертежа штампуемой детали и ее параметров выбирают типовую конструкцию штампа из имеющихся в компьютерной базе знаний, которая наиболее близко отвечает заказу, а также тип раскроя детали в полосе (заготовке). С учетом перемычек и параметров операции получения заготовки рассчитывают технологические параметры (ширину полосы, шаг штамповки и др.). Для последовательного штампа определяют последовательность переходов.

Разработку конструкции штампа для листовой штамповки можно начинать при задании следующих исходных требований: чертеж (или его эквивалент в 3D виде) на штампуемую деталь (рис. 12), ее толщина, марка материала,

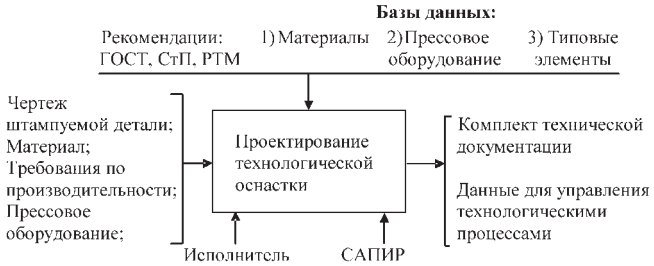

Рис. 10. Внешнее окружение процесса проектирования штампа

объем выпуска и др. Эти сведения в САПИР определены как формализованное техническое задание на разработку конструкции штампа. Здесь следует отметить, что для проектирования штампов ЛШ обычно достаточно использование двумерных графических систем.

Автоматически обычно выполняют раскрой полосы (ленты) на заготовки: наклонный, штамповку с поворотом полосы и двухрядный, а затем выбирают наиболее экономичный (при каждом типе раскроя автоматически определяется КИМ). Использование различных типов раскроя позволяет исполнителю добиваться приемлемого значения КИМ (рис. 13). Величина перемычки между двумя штампуемыми деталями в полосе рассчитывается исходя из

Рис. 11. Действия, выполняемые исполнителем при проектировании последовательных штампов в САПИР/ЛШ:
T – выбор конструктором из таблицы; *D* – ввод конструктором данных в диалоге; *E* – расчет по формулам и утверждение результатов конструктором; *R* – графическое редактирование решения; *G* – генерация графических фрагментов

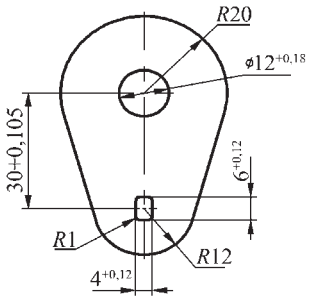

Рис. 12. Чертеж штампуемой детали с указанием параметров обработки

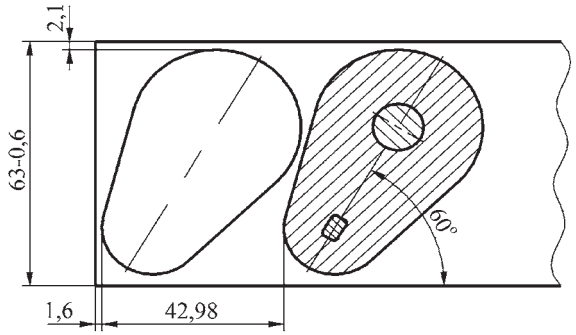

Рис. 13. Пример оформления однорядного раскроя материала из полосы

практических рекомендаций. Решение задачи раскроя в САПИР полностью автоматизировано.

Основные рабочие элементы конструкции штампа по своему профилю в общем случае должны соответствовать чертежу штампуемой детали.

В штампуемой детали обычно присутствуют один или несколько внутренних контуров, которые необходимо пробить. Форма контуров детали может быть произвольной.

2. В результате предыдущих действий формируется рабочая зона штампа, по которой можно рассчитать силу штамповки. Это, в свою очередь, позволит определить габаритные размеры пакета штампа, количество и параметры крепежа штампа. В зависимости от требований к штампуемой детали, ее габаритов, формы и т.д. выбирают дополнительные фиксирующие элементы (фиксаторы, прижимы) и элементы системы выталкивания.

3. Далее возможности по проектированию штамповой оснастки в САПИР будем рассматривать на примере разделительных штампов. Разделительный штамп принадлежит к широкому классу прессовой оснастки, выполняющей операции вырубки, отрезки и пробивки по заданным контурам детали из различных материалов (металл, резина, пластмасса, картон и др.).

Геометрические зависимости между контурами исходной детали и контурами пуансона и матрицы приведены в нормативно-справочной документации. Характер этих зависимостей показан на рис. 14. Практика показывает, что точность основных рабочих элементов штампа должна быть на два квалитета выше точности, заданной для штампуемой детали.

На основе точности штампуемой детали и ее конфигурации конструктор формирует требования к отдельным элементам конструкции штампа и сборочным единицам. Материал детали, ее толщина и габариты позволяют рассчитать необходимые силы штамповки.

Форма материала заготовки (лист, полоса, отходы и др.) также определяет ряд конструктивных элементов штампа.

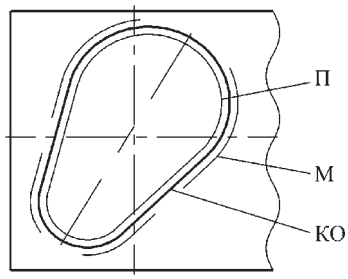

Рис. 14. Эквидистантные зависимости между внешними контурами режущих кромок пуансона П и матрицы М по отношению к кромке обрабатываемой детали КО

К ним, в первую очередь, относятся специальные направляющие и фиксирующие элементы, обеспечивающие строго определенное положение заготовки в рабочей зоне штампа в процессе выполнения операции. Формы штампуемой детали и исходного материала заготовки определяют конструкцию элементов штампа, необходимых для удаления отштампованных деталей и отхода из зоны штамповки. Таковы некоторые основные взаимосвязи между штампуемой деталью и формой материала заготовки, которые учитываются в ходе проектирования конструкции штампа.

В разделительном штампе совмещенного действия вырезку по внешнему контуру и пробивку внутреннего контура выполняют одновременно с помощью пуансон-матрицы (рис. 15), представляющей собой пуансон для вырубки наружного контура, в котором размещена матрица для пробивки отверстия. То есть вырезку детали из исходной заготовки осуществляют с помощью пуансон-матрицы, пуансонов и матриц. Последние относятся к основным рабочим элементам штампа.

Помимо этого непосредственно с подвижными элементами режущей части штампа взаимодействуют съемники и выталкиватель, обеспечивающие фиксацию заготовки в зоне его деформации, удаление детали и отходов заготовки из штампа. Все вышерассмотренные элементы, собранные в определенную конструкцию, образуют основную часть штампа, которая называется пакетом. Пакет устанавливают в блок штампа.

Обычно, если к детали предъявляют повышенные требования по точности взаимного расположения контуров и если перемычки между внутренними контурами достаточно велики, то операции вырезки по внешнему контуру и пробивки внутренних контуров осуществляют одновременно в штампе совмещенного действия.

В последовательном штампе получают менее точные детали (12-й – 14-й квалитеты точности) с возможностью прогиба по плоскости. Последовательные штампы более производительны и менее сложны в изготовлении. Это позволяет изготовлять детали сложной формы за счет разнесения операций пробивки отверстий и вырубки контура на разные шаги или обрубки контура отдельными пуансонами.

4. Взаимодействующие элементы пакета штампа крепятся на специальных плитах (рис. 16). Соосность подвижных частей всей конструкции штампа и их взаимное перемещение обеспечиваются направляющими колонками и втулками. Соответствующие части пакета в блоке штампа штифтуют и крепят резьбовыми соединениями на верхней и нижней плитах.

В конструкции последовательного штампа в отличие от совмещенного чаще всего осуществляют сначала пробивку отверстий, а затем вырубку наружного контура. В такой же последовательности осуществляют и формоизменяющие операции (гибку, пуклевку, формовку и др.), а лишь затем вырубают или отрезают внешний контур. Иногда встреча-

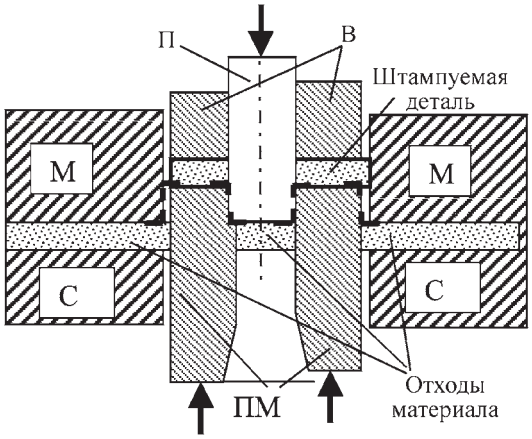

Рис. 15. Разрез рабочих элементов пакета разделительного штампа совмещенного действия:
стрелки указывают направление приложения сил пресса к штампу; утолщенной линией выделены режущие кромки штампа; П – пуансон; В – выталкиватели детали; ПМ – пуансон-матрица; М – матрица; С – съемник

ются конструкции штампа, где отрезка может быть совмещена с гибкой.

5. С помощью хвостовика (или прихватами) верхняя плита штампа жестко связана с ползуном пресса.

Нижнюю плиту блока чаще крепят прихватами на столе пресса. Так как штамп является прессовой оснасткой, то его габаритные размеры должны учитывать размеры стола пресса, соответствовать развиваемым силам при штамповке, закрытой высоте и провальным окнам пресса.

6. Исходную заготовку можно фиксировать в рабочей зоне с помощью упоров для совмещенного штампа. Кроме того, для фиксации используют ножи, планки, фиксаторы для последовательного штампа. Элементы фиксации в конструкции штампа определяет исполнитель в зависимости от требований к детали.

7. В комплект документации входят: сборочный чертеж конструкции штампа (рис. 17), чертежи деталей и спецификация. Штамп средней сложности состоит из 15...25 деталей, на каждую из которых, если она не стандартная, надлежит обязательно выпустить конструкторский чертеж. Основу оригинальной части конструкции штампа (пакета) составляют пуансоны и матрицы, съемники, пуансонодержатели и др.

8. Оформление документации в ходе проектной деятельности исполнителя в САПИР штампов связано с формированием рабочих профилей отдельных деталей пакета штампа. Для этого конструктор должен определить форму посадочных элементов пуансонов (рис. 18), провальных отверстий (если их требуется упростить), формой заплечиков выталкивателей и др. После уточнения квалитета точности штампуемой детали (или отклонений проставленных на чертеже (см. рис. 12)), размеров заплечиков, увеличения провальных отверстий и т.д. формируют рабочие элементы пуансонов, матриц, пуансон-матриц, пуансонодержателей, съемников.

При проектировании исполнитель выбирает различные конструкции пуансонов: пробивные, формовочные, отбортовочные, пуансоны для пуклевки и надрезки с гибкой. Все пуансоны в САПИР проверяются на устойчивость. Наличие в библиотеке САПИР фрагментов пуансонов позволяет ис-

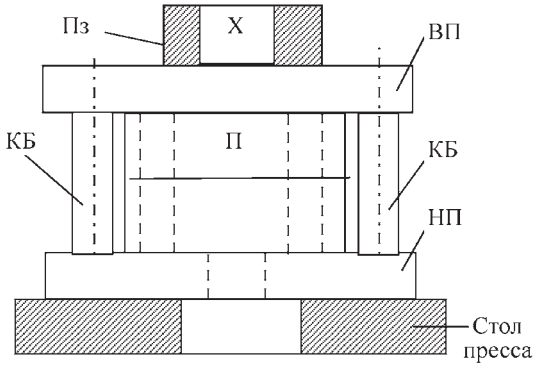

Рис. 16. Блок штампа:
П — пакет с рабочими элементами; КБ – колонки блока; Пз – ползун пресса, соединенный с хвостовиком блока штампа Х; ВП и НП – соответственно верхняя и нижняя плиты

полнителю быстро делать любые сечения основных деталей штампа (матрица, съемник и др.) и сборочных чертежей.

На этом проектирование пакета штампа практически закончено. Отдельные узлы прижимов, выталкивателей, ловителей, упоров, пробивных (или формоизменяющих) пуансонов, а следовательно, и отверстий под них в съемниках и пуансонодержателях формируют как отдельные объекты проектирования. Но в результате параметризации эти узлы размещаются в конструкции штампа либо автоматически, либо под управлением исполнителя.

9. После завершения проектирования пакета штампа и его отдельных узлов выбирают тип блока штампа и рассчитывают его параметры. По габаритам блока штампа и силе штамповки выбирают прессовое оборудование. После выбора пресса устанавливают характеристики рабочего пространства, которые должны быть учтены в конструктивных параметрах элементов штампа (рис. 19). Кроме того, из рабочих характеристик следует учитывать величину провального отверстия в плите пресса, которая должна обеспечить удаление деталей и отходов (высечки) или обеспечить достаточную силу съемника, если буфер прикреплен к нижней плите штампа.

При проектировании буфера САПИР отслеживает ситуации, когда диаметр требуемого буфера больше отверстия в плите прессового оборудования. В этом случае САПИР информирует исполнителя о несоответствии выбранного оборудования и буфера, и исполнителю следует выбрать другой пресс с бóльшим отверстием в плите или принять другое решение.

Штампы проектируют на конкретные прессы в соответствии с их техническими характеристиками или на группу близких по мощности и техническим характеристикам прессов. В левой части рис. 19 приведена типовая схема рабочего пространства кривошипного пресса, а в правой – сечение сборки конструкции штампа, который устанавливают в прессовое оборудование. Здесь приведены основные размерные взаимосвязи между рабочим пространством пресса и конструкцией штампа. Сведения из этой схемы необходимы конструктору при проектировании штампа.

Закрытая высота штампа (в нижнем рабочем положении) должна находиться между наибольшей и наименьшей закрытыми высотами пресса: $H_2 = H - M$. В большинстве случаев принимают, мм: $H - 5 \geq H_{шт} \geq H_2 + 10$.

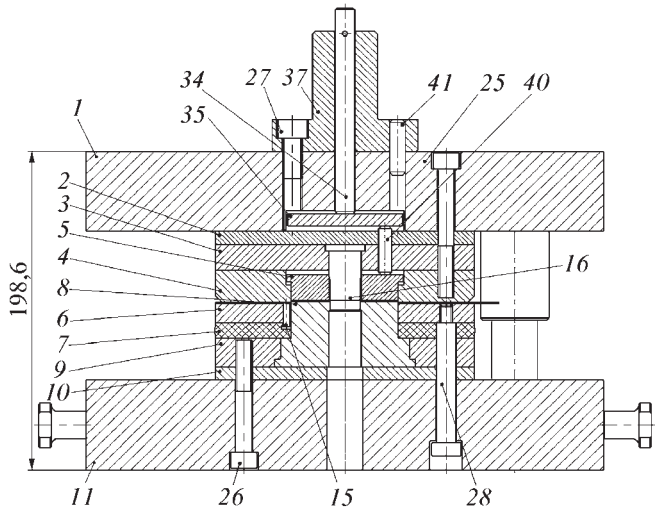

Рис. 17. Пример оформления основного разреза совмещенного штампа

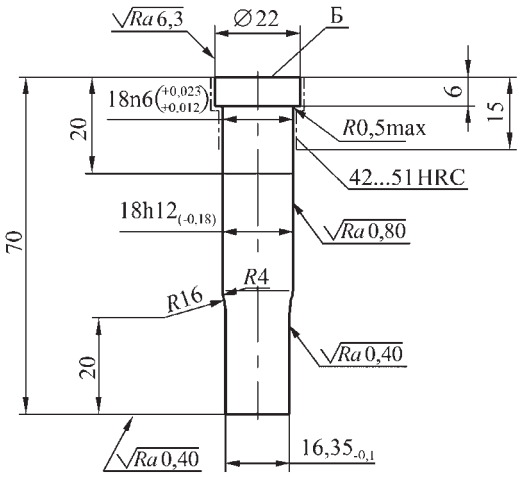

Рис. 18. Пуансон для пробивки отверстий

В случае если закрытая высота штампа $H_{шт}$ меньше H_2, необходимо применение в конструкции штампа промежуточных подкладных плит с высотой H_1.

Тип хвостовика выбирает исполнитель в зависимости от конструкции штампа и традиций предприятия. В зависимости от выбранного прессового оборудования САПИР определяет размеры хвостовика и его конструкцию в автоматическом режиме.

Систему выталкивания в конструкции штампа совмещенного действия устанавливают в зависимости от конструкции хвостовика, сил выталкивания и формы штампуемой детали. В САПИР предусмотрены все виды стандартных траверс; также исполнитель может сконструировать нестандартную траверсу с числом штифтов от 2 до 4 шт. В этом случае, обладая информацией о центре давления, исполнитель сам редактирует расположение штифтов толкателя (рис. 20).

10. В компьютерной базе данных САПИР предусмотрены все стандартные блоки и хвостовики, а также отдельно плиты, колонки и втулки. Возможности исполнителя по управлению конфигурацией штампа совмещенного действия приведены на рис. 21. Допустимые варианты для управления конфигурацией показаны в табл. 5.

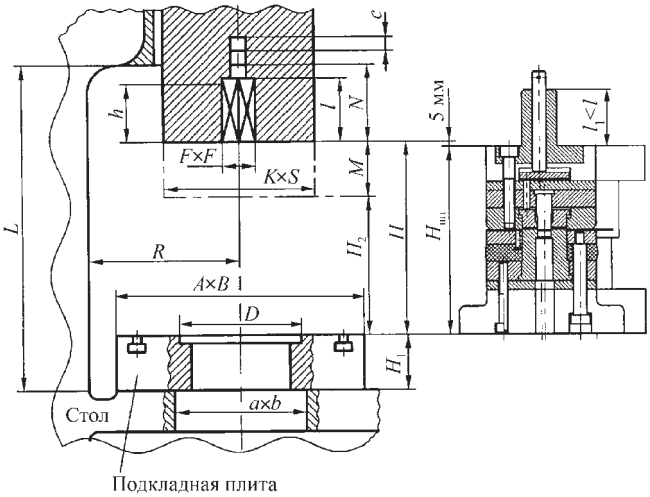

Рис. 19. Рабочее пространство кривошипного пресса и связь его размерных характеристик с конструкцией штампа

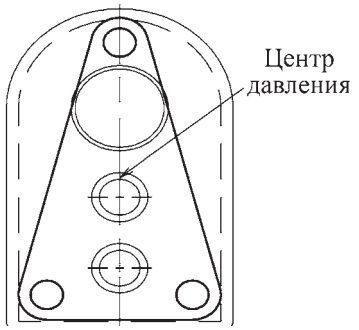

Рис. 20. Нестандартная траверса системы выталкивания

11. Практически все элементы (съемники, выталкиватели, пуансонодержатели и др.) пакета штампа подлежат в той или иной степени конструкторскому синтезу, подобному ранее описанному для проектирования пробивных пуансонов (см. рис. 18). Полученные расчетным путем размерные параметры элементов конструкции штампа должны быть оформлены в виде соответствующих чертежей. САПИР формирует только контуры оригинальных деталей пакета, а остальная часть чертежей на штамп хранится в библиотеке САПИР в виде описания прототипов, которые пополняются и по мере необходимости редактируются исполнителем. Описание геометрии в форме прототипа чертежа относится к базовому варианту. Окончательные чертежи отдельных деталей при необходимости могут быть отредактированы пользователем по своему желанию.

Аналогичным образом проектируют далее параметры деталей блока штампа. В отличие от оригинальной части пакета штампа, где главной задачей был синтез контуров рабочих частей штампа (пуансонов и матрицы), при проектировании деталей блока главная задача связана с выбором параметров габаритов блока, его типа и конфигурации.

В блоке штампа верхнюю плиту обычно выполняют подвижной. Число и способ размещения колонок в блоке штампа определены прототипом. Параметры и конструкция этих направляющих могут также являться предметом конструкторского синтеза, которые и можно редактировать впоследствии. В задачах выбора параметров крепежа и под-

Рис. 21. Возможности пользователя по управлению конфигурированием проектируемых штампов совмещенного действия

вижных соединений определяются координаты размещения элементов, их размеры и точность посадок. Система крепежа пакета в блоке штампа зависит от силовых параметров и его габаритов. Входными данными для решения этих задач являются силы штамповки, габаритные и точностные параметры рабочих деталей: матрицы, пуансона-матрицы и пуансонов. Эти данные формирует САПИР в автоматическом режиме.

12. Спецификация на штамп формируется автоматически с учетом выбранной конструкции и ее наполнения отдельными узлами. Редактирование спецификации позволяет исполнителю менять любые ее параметры. Причем после обновления отдельных чертежей все изменения отразятся как на форматках чертежа, так и на общем виде.

Если исполнитель изменял какие-либо значения параметров конструкции штампа через словарь САПИР, то все изменения автоматически вносятся САПИР во все детали, сборочные узлы и спецификации. Это значительно уменьшает возможность возникновения конфликтных ситуаций между отдельными чертежами деталей и сборок в ходе проектирования конструкции штампа.

Реализация в САПИР рассмотренных выше методов синтеза штампов по прототипу возможна на основе использования интерактивных диалоговых режимов. Структура построения схемы диалогового проектирования штамповой оснастки показана на рис. 22.

Каждому прототипу штампа соответствует определенная структура, отображенная в соответствующей совокупности заготовок чертежей, и сценарий, определяющий последовательность операций диалогового проектирования (последовательность кадров). Схема проектирования (рис. 22) при наличии станков с ЧПУ может дополняться блоками и процедурами синтеза управляющих программ для обработки всех или ряда деталей.

Далее представим процесс проектирования последовательного штампа в САПИР (для детали, подобной на рис. 12) **с интерфейсами экранов монитора основных этапов работы.**

Процесс состоит из выполнения следующих этапов: 1) создание/открытие проекта; 2) выбор прототипа объекта проектирования; 3) ввод исходных данных; 4) выполнение расчетов; 5) оформление комплекта КД.

Создание проекта. Проектирование штампа начинается с создания нового проекта или использования существующего из библиотеки типовых сценариев проектирования. Проект представляет собой информационную структурную единицу, содержащую одну разработку (штамп ЛШ) в виде инженерных расчетов и конструкторской документации в электронном виде и однозначно определяется своим именем и наименованием (рис. 23). Такой подход дает возможность конструктору проектировать штамп за несколько сеансов работы с ЭВМ, многократно обращаясь к разработанному проекту для корректировки результатов расчетов или пересчета деталей штампа.

Выбор прототипа. Здесь конструктор определяет штамп с конкретной структурой рабочих элементов, т.е. на уровне знаний – выбирает конкретные графические прототипы чертежей штампа и конкретные вычислительные модели (рис. 24), необходимые для расчета выбранного штампа.

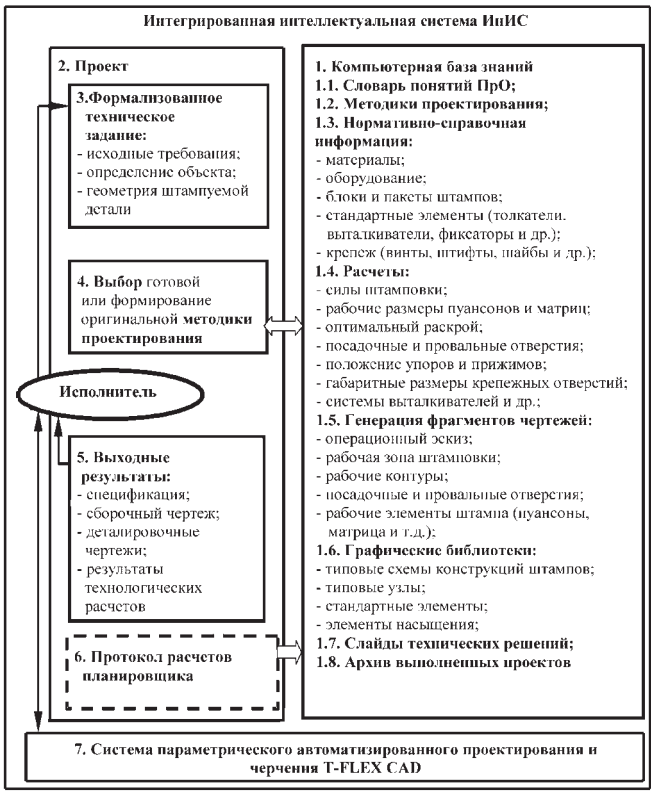

Рис. 22. Структура САПИР при проектировании технологической оснастки на примере проектирования штампов листовой штамповки

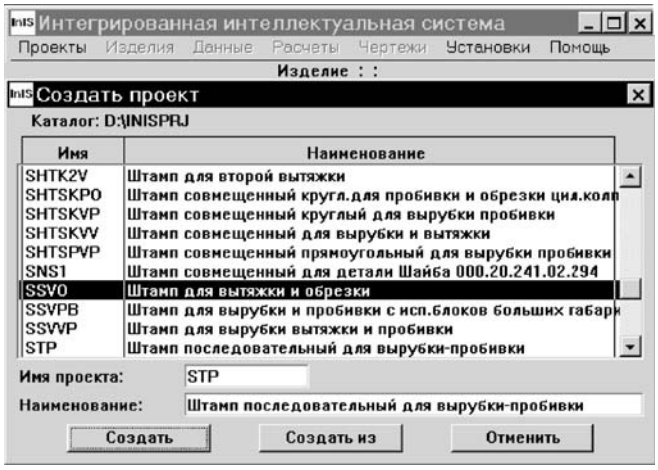

Рис. 23. Создание проекта с именем STP

Ввод исходных данных. К исходным данным относятся: 1) чертеж штампуемой детали, созданный средствами T-FLEX CAD (рис. 25,) или импортированный в электронном виде из других систем (T-FLEX CAD поддерживает большинство возможных интерфейсов); 2) толщина и марка материала (выбирается из предлагаемой системой базы данных материалов); 3) сведения для заполнения основной надписи чертежа (обозначение штампа, обозначение детали, фамилия конструктора, разработавшего чертеж, нормо- и технического контролера и др.) в случае их повторения от проекта к проекту могут быть зафиксированы в качестве умолчаний.

Выполнение расчетов. В процессе конструкторского проектирования штампа пользователь может просматривать и редактировать по своему усмотрению предлагаемые САПИР варианты решений как в символьной, так и в графической форме и в общем случае включает в себя:

– формирование операционного эскиза штампуемой детали;

– генерацию схемы раскроя и рабочей зоны штампа;

– расчет исполнительных размеров рабочих деталей штампа;

– генерацию рабочих и посадочных контуров деталей штампа, провальных окон и др.;

– расчет центра давления, усилий штамповки и зазоров;

– выбор прессового оборудования;

– конструирование рабочих деталей пакета штампа;

– выбор и расчет блока штампа (плиты, колонки и втулки);

– конструирование деталей и узлов общего назначения (хвостовик, упоры, прижимы и др.);

– подбор стандартного крепежа и его расстановка на стандартных и нестандартных (крупногабаритных) пакетах.

Деятельность конструктора по проектированию штампов в САПИР/ЛШ строится по принципу "Смотри и выбирай". При этом от конструктора требуется понимание сути процессов проектирования штампов, умение управлять системой в диалоге и навык работы с T-FLEX CAD. Для конструктора процесс проектирования штампов ЛШ в САПИР сводится к заполнению или редактированию содержимого полей экранных форм, выбору элементов из таблицы, и работе с параметрическими чертежами. Всю остальную работу выполняет ЭВМ в автоматическом режиме.

Экранная форма представляет собой окно, состоящее из полей различного назначения. При этом возможны следующие типы полей: обязательные для ввода информации поля; поля для выбора из ассоциативного списка; необязательные поля; поля, не подлежащие редактированию. Заполнение полей экранной формы данными возможно без контроля, с синтаксическим (целые, действительные числа, алфавитно-цифровая информация) или семантическим контролем данных.

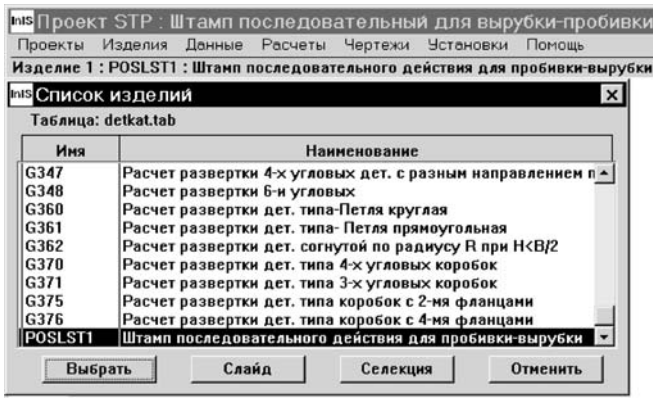

Рис. 24. Выбор прототипа объекта проектирования

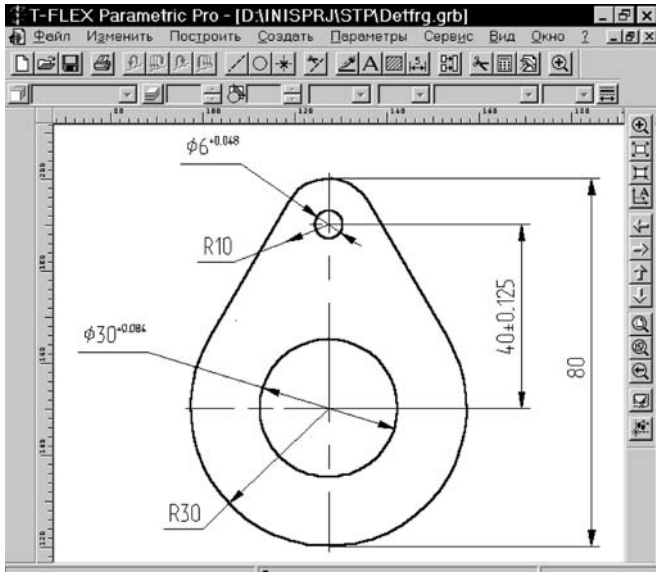

Рис. 25. Чертеж штампуемой детали

Поля для выбора из ассоциативного списка подразумевают наличие перечня допустимых значений, из которого необходимо выбрать одно.

Оформление комплекта КД. Результатом работы конструктора с САПИР является полный комплект конструкторской документации, включающий: эскиз штампуемой детали, карту раскроя, сборочные чертежи (рис. 26) и спецификации к ним, а также деталировочные чертежи. Следует отметить, что контуры рабочих деталей штампа с исполнительными и посадочными размерами (матрица, пуансоны, съемник, пуансонодержатель и т.д.) генерируются автоматически и в виде фрагментов проявляются на требуемых чертежах в рассчитанных точках привязки. Само оформление чертежей, если оно требуется, сводится для конструктора к редактированию расположения в поле чертежа видов, размерных линий, знаков шероховатости, надписей и др.

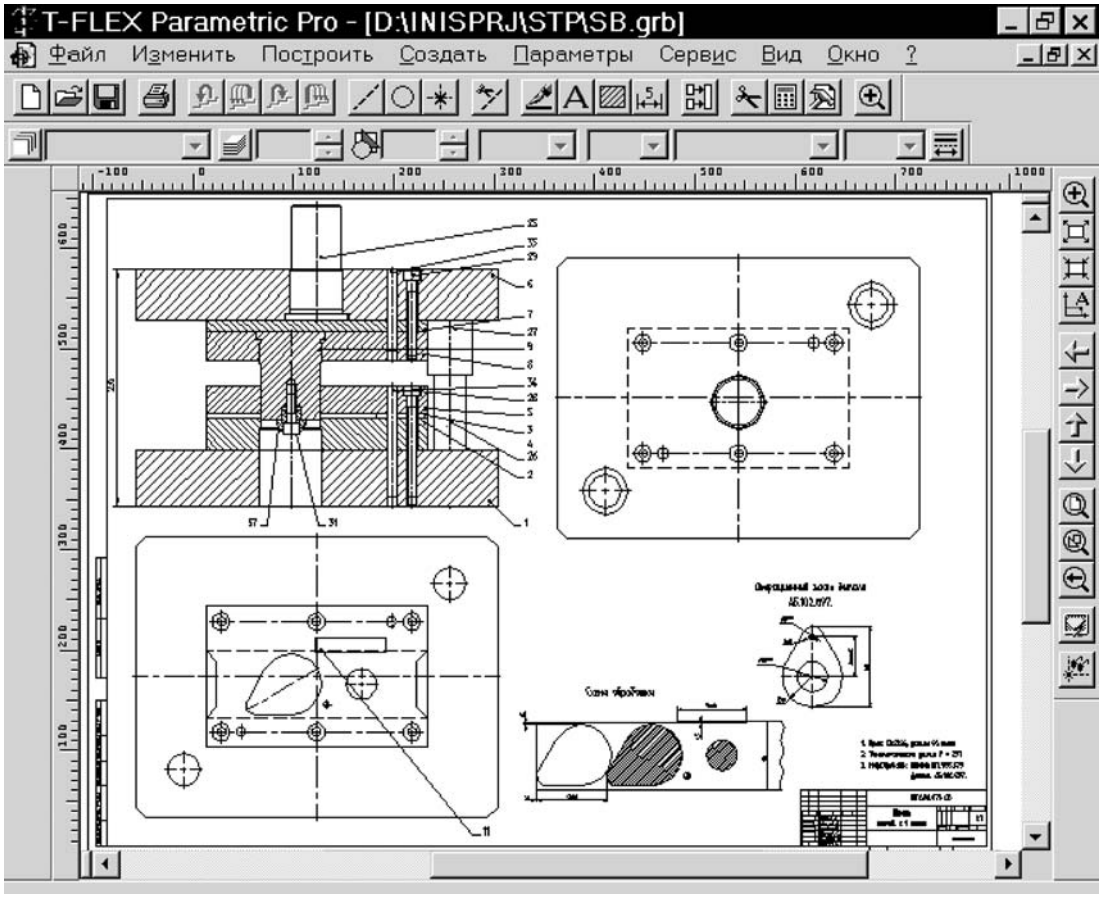

Рис. 26. Сборочный чертеж спроектированного штампа

Заключение

Сегодняшний рынок программных продуктов представлен многими системами, решающими подобный класс задач. Поэтому перед покупателем встает вопрос выбора системы, которая в максимальной степени и с наилучшим качеством решает его проблемы и приемлема для него по цене. С использованием САПИР штамп для детали, изображенной на рис. 25, был спроектирован в течение 20 мин, причем основное время ушло на ввод чертежа детали. Качество спроектированного штампа обеспечено наличием хорошо отлаженной и постоянно пополняемой базы знаний, учитывающей основные ГОСТы, РТМ, опыт и навыки передовых экспертов по штамповке за последние 10...15 лет.

Зарубежные системы автоматизированного проектирования, успешно работающие в области создания технологического оснащения, созданы на основе программных продуктов PowerSolution, UG, Pro/E, CATIA и др. Установлено, что бóльшая часть этих программных средств не адаптирована к условиям эксплуатации в России (по станочному парку, материалам, режимам эксплуатации, нормализованным компонентам и др.) и поэтому приводит к повышенным затратам. Например, программу SolidWorks можно приобрести на мировом рынке за 5000 $, а его адаптация для эксплуатации в России стоит 7000 $, не считая НДС.

Быстрая и малотрудоемкая корректировка программно-информационного обеспечения САПР в целях адаптации в новых условиях пользователя обеспечивается многоуровневой модульной структурой системы, разделением информационных и программных компонент системы, решением проектных задач на основе развитых баз данных, максимальным использованием программных компонент и машинных средств разработки и отладки системы.

Расширение номенклатуры проектируемых на ЭВМ конструкций штампов при минимальных затратах времени на корректировку базового варианта программной системы возможно простановкой в неявном виде (в виде переменного параметра) размеров штампуемых деталей в базовой конструкции штампа. Этот способ практически не вызывает каких-либо существенных изменений в программе.

Уровень технической подготовки, стандартизация, унификация и типизация деталей и сборочных единиц штампов, серийность производства определяют особенности их проектирования. Чем выше уровень, тем рациональнее процесс проектирования.

Перспективы развития САПР ТП и Ш. Одновременно с необходимостью дальнейшего развития технического, математического и комплексного обеспечения системы АП важнейшими направлениями развития являются создание и совершенствование математических моделей различных технологических и конструкторских задач, создание экономичных эвристических моделей принятия технологических и конструкторских решений. Решение других задач может быть выполнено системными программистами, приобретением технических средств.

Виктор Григорьевич Ковалёв, д-р техн. наук;
Анатолий Викторович Рыбаков, канд. техн. наук

УДК 621.983.3

П.В. Сёмин, В.А. Сёмин, Н.Л. Лисунец
(Московский государственный институт стали и сплавов)

Влияние частоты вращения заготовки и инструмента на процесс раскатки дисков в изотермических условиях

Исследовано влияние режимов опережения и отставания при раскатке дисков из титанового сплава ВТ9 на стане АЛРД-800 на основные параметры раскатки. Приведены зависимости исследованных параметров от частоты вращения инструмента (роликов) при опережении и отставании. Даны практические рекомендации по согласованию скоростей вращения заготовки и инструмента при раскатке дисков.

The article considers the influence of regimes of lead and backward slip during expansion of discs made of titanium alloy ВТ9 on АЛРД-800 mill on basic parameters of the process. Dependencies of investigated parameters on speed of rotation are brought. Recommendations on cooperativeness of rotation speeds of the blank and the tool are done.

Раскатка – один из видов локального деформирования металла, в процессе которого вращаются заготовка и инструмент (ролики). При этом инструмент может совершать радиальные и осевые перемещения относительно заготовки (рис. 1).

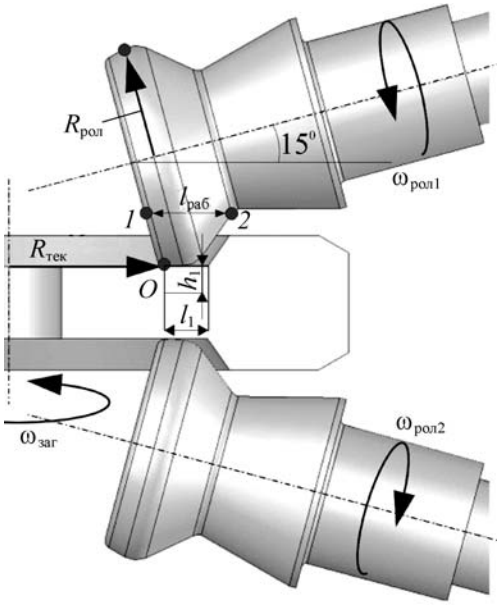

Рис. 1. Схема, поясняющая процесс опережения и отставания роликов и заготовки

Процесс раскатки в изотермических условиях является неустойчивым [1]; при высокой пластичности материала несоблюдение технологических режимов раскатки может привести к значительному неконтролируемому растяжению полотна диска. Этому способствует и не совсем удачная схема деформации диска – растяжение по радиусу.

В процессе раскатки сама заготовка и инструмент вращаются с разными угловыми скоростями, однако линейные скорости в месте их соприкосновения всегда должны быть равны (режим согласования). На практике очень трудно (технически и программно) согласовать эти скорости. Более того, отдельные части инструмента (ролика) находятся в разных радиальных зонах заготовки (диска) и, естественно, даже по длине ролика не происходит согласования скоростей.

Вращение роликов относительно заготовки весьма важно в плане проработки нужной структуры диска при раскатке, а отставание или опережение роликов при раскатке влияет на качество поверхности и проработку структуры заготовки.

Описываемое явление было исследовано с помощью системы DEORM-3D. По убеждению авторов эта конечно-элементная система при соответствующей программной подготовке исходных данных позволяет рассчитывать такие технологические особенности процесса, как опережение и отставание.

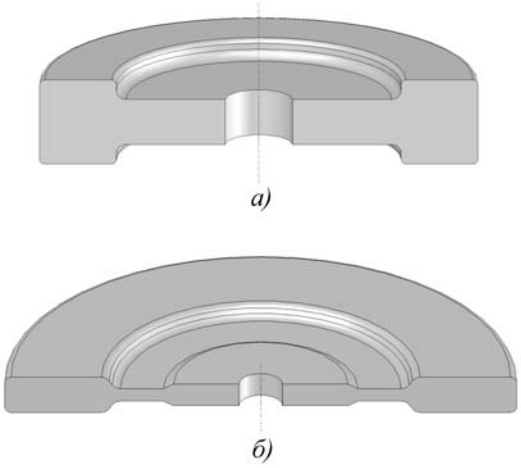

Рис. 2. Исходная (*а*) и конечная (*б*) формы заготовки из сплава ВТ9:
диаметр заготовки 500 мм; диаметр диска после раскатки 700 мм

При расчете в качестве исходной заготовки взят диск из сплава ВТ9 диаметром 500 мм, который раскатывали до получения изделия диаметром 700 мм (рис. 2). Была составлена траектория раскатки диска нужной конфигурации, которая повторяла геометрию конечной заготовки. Методика исследования по опережению и отставанию скоростей движения инструмента и заготовки заключалась в следующем.

1. Опережение и отставание роликов исследовали в диапазоне рациональных скоростей вращения заготовки и роликов.

2. Исследования проводили при внедрении роликов в осевом направлении на величину 4,55 мм и радиальном продвижении ролика на 30 мм (участки h_1 и l_1 на рис. 1). Методика исследования представлена в табл. 1, 2.

Предложенная методика исследований составлена таким образом потому, что она перекрывает технические возможности стана раскатки АЛРД-800 и проводилась при рациональных режимах раскатки для титановых сплавов, установленных экспериментально (скорость вращения заготовки 0,5 мин$^{-1}$; подача инструмента 2,5 мм/об) [1].

В процессе исследования режимов отставания и опережения анализировали такие термомеханические параметры, как силу раскатки, скорость деформации, температуру.

Расчеты по опережению и отставанию для раскатки в осевом и радиальном направлениях представлены на рис. 3. Участок, выделенный на рис. 3 штриховыми линиями, соответствует частоте вращения роликов в точках *О*, *1* и *2*.

Анализ результатов показывает, что режим согласования является оптимальным по силе и температуре: сила раскатки минимальна, повышение температуры в очаге деформации составило всего 2 °С.

При раскатке в осевом направлении режим отставания наиболее неблагоприятен, так как резко возрастает сила раскатки до 210 кН. В режиме опережения сила раскатки несколько ниже, также более благоприятны температурные условия. При раскатке в осевом направлении режимы отставания и опережения снижают скорость деформации металла.

При радиальной раскатке режим отставания мало влияет на силу раскатки, несколько снижает скорость деформации металла и понижает температуру в очаге деформации. Режим опережения более благоприятен во всем исследуемом диапазоне, чем режим согласования.

1. Линейные скорости (мм/мин) заготовки и роликов в режимах согласования, опережения, отставания при $R_{тек}$ = 103 мм; $R_{рол}$ = 75 мм

Заготовка	Ролик	Ролик			Ролик		
Режим согласования		Режим опережения			Режим отставания		
$V_{заг}$	$V_{рол}$	$V_{рол1}$	$V_{рол2}$	$V_{рол3}$	$V_{рол11}$	$V_{рол22}$	$V_{рол33}$
51,3	51,3	60	75,75	91,5	42,6	26,47	10,95

Примечание. $R_{тек}$ – текущий радиус раскатки; $R_{рол}$ – радиус ролика; $V_{заг}$ – линейная скорость заготовки в точке *О* (см. рис. 1); $V_{рол}$ – линейная скорость ролика; $V_{рол1}$, $V_{рол2}$, $V_{рол3}$ – линейные скорости ролика в трех различных режимах опережения; $V_{рол11}$, $V_{рол22}$, $V_{рол33}$ – линейные скорости ролика в трех различных режимах отставания.

2. Отношение линейных скоростей ролика и заготовки

Заготовка	Ролик	Ролик			Ролик		
Режим согласования		Режим опережения			Режим отставания		
$V_{рол}/V_{заг}$		$V_{рол1}/V_{заг}$	$V_{рол2}/V_{заг}$	$V_{рол3}/V_{заг}$	$V_{рол11}/V_{заг}$	$V_{рол22}/V_{заг}$	$V_{рол33}/V_{заг}$
1		1,17	1,47	1,78	0,83	0,52	0,21

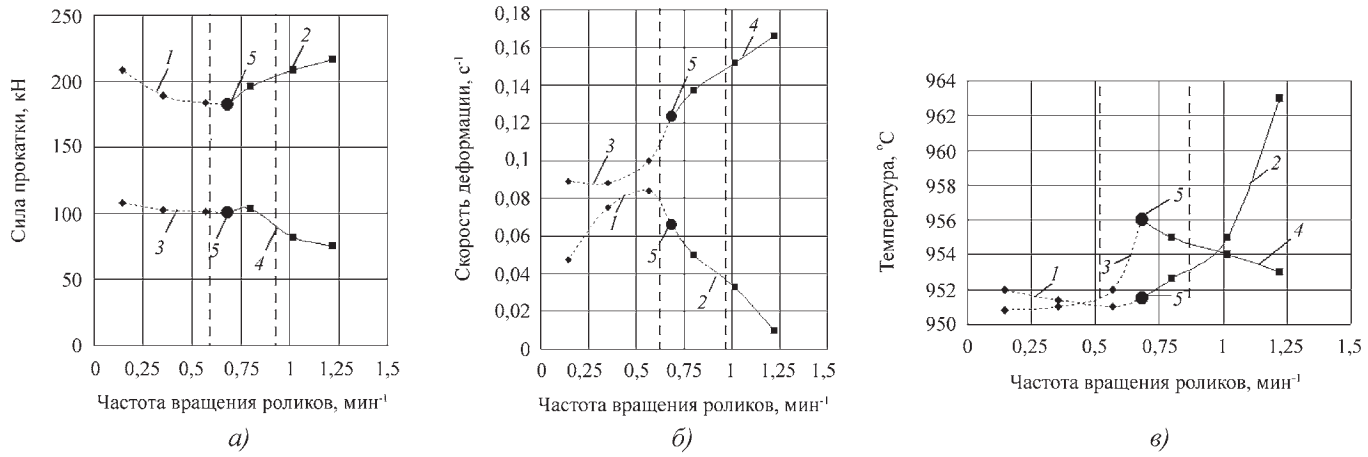

Рис. 3. Зависимость силы (*а*), скорости деформации (*б*) и температуры (*в*) раскатки от величины опережения-отставания (начальное значение $R_{тек}$ = 102,65 мм):
1 – осевая раскатка, режим отставания; *2* – осевая раскатка, режим опережения; *3* – радиальная раскатка, режимы отставания; *4* – радиальная раскатка, режимы опережения; *5* – радиальная раскатка, режим согласования; - - - – частота вращения в крайних точках ролика (*О*, *1*, *2*) при контакте с заготовкой

Полученные результаты говорят о том, что согласование роликов нужно проводить не в точке *О*, а гораздо ближе к наклонному участку ролика. При этом согласование скоростей желательно проводить по разным точкам ролика: при осевой раскатке – в точке *О*, если раскатка наклонным участком – приблизительно в середине наклонного участка.

При обработке данных по исследованию опережения и отставания для каждого режима раскатки брали наибольшую величину исследуемых параметров.

Выводы

Раскатка в режиме согласования (линейные скорости заготовки и роликов равны) является наиболее благоприятным режимом.

При раскатке в радиальном направлении режимы опережения и отставания практически не влияют на температурно-скоростные условия процесса.

При раскатке в осевом направлении режимы опережения и отставания существенно влияют на основные условия процесса, ухудшая условия раскатки, по сравнению с режимом согласования.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кайбышев О.А., Утяшев Ф.З.** Сверхпластичность, измельчение структуры и обработка трудноформируемых материалов. М.: Наука, 2002.

2. **Сёмин В.А., Сёмин П.В.** Математическое моделирование раскатки колец и дисков из сплавов титана // Научно-технический журнал Titan. 2004. № 2 (15). С. 59–63.

Владимир Алексеевич Сёмин, канд. техн. наук;
Петр Владимирович Сёмин, инженер;
Николай Леонидович Лисунец, канд. техн. наук

Ю.Г. Гуревич *(Курганский государственный университет)*

Использование отходов серого чугуна для производства износостойкого композиционного материала

Исследована возможность использования отходов серого чугуна для производства износостойкого композиционного материала – карбидочугуна. Найдены оптимальные составы карбидочугуна системы TiC–Cr_3C_2–СЧ и оптимальные режимы производства деталей с высокими механическими свойствами.

The article shows the possibility to use the waste of gray pig iron for the production of wear-resistant composition – carbide pig iron. The optimum composition of carbide pig iron of the following system TiC–Cr_3C_2–СЧ and optimum regimes of production of details with the high mechanical characteristics have been found.

Известны композиционные материалы, применяемые для изготовления износостойких деталей состава TiC–СЧ. Такой материал получают прессованием шихты, содержащей чугунный порошок, 20...50 % порошкообразного карбида титана и в случае необходимости дополнительно металлические порошки, улучающие структуру металлической матрицы. Технология изготовления такого чугуна включает прессование, предварительное спекание, повторное прессование и окончательное спекание.

Серьезными недостатками такой технологии получения карбидочугуна являются повторное прессование и спекание, применение дорогостоящих металлических порошков и значительное отличие размеров прессовки от размеров готовой детали. По этим причинам описанный способ получения композиционного материала не получил широкого распространения.

В связи с этим была поставлена задача получить карбидочугун методом одноразового прессования и спекания, который значительно упрощает технологию получения этого композиционного материала и позволяет лучше сохранять размеры прессовки после спекания.

В качестве компонентов карбидочугуна использовали порошки серого чугуна, карбида титана и карбида хрома. Порошок серого чугуна получали измельчением отходов этого материала при обработке деталей резанием. Чугун соответствовал марке СЧ20. Порошок карбида титана производства Донецкого завода химреактивов (ТУ 6-09-492-75) состава, % мас.: 79,3 Ti; 18,78 $C_{общ}$; 0,36 $C_{своб}$; 1,7 O_2.

Статистический анализ данных измерений частиц серого чугуна под микроскопом показал, что их средний размер составлял (99,7±9,1) мкм.

Порошок карбида хрома имел следующий состав, % мас.: 86,0 Cr; 13,2 $C_{общ}$; 0,2 $C_{своб}$. Состав карбида соответствовал формуле Cr_3C_2. Гранулометрический анализ показал, что средний размер частиц карбида хрома (25,2±1,26) мкм.

При получении прессовок использовали глицерин Черкасского завода.

Компоненты (порошки серого чугуна, карбида титана и карбида хрома), взятые в необходимых пропорциях, смешивали в смесители типа "пьяная бочка". В полученную шихту добавляли глицерин и прессовали в пресс-формах. В качестве прессового оборудования использовали пресс ДМ30М. Готовые прессовки высушивали в вакуумном шкафу (остаточное давление 0,13 Па). Спекание полученных прессовок проводили в печи сопротивления с угольным нагревателем. В качестве нагревателя использовали угольную трубу длиной 480 мм и наружным диаметром (97±0,25) мм. Толщина стенки составляла 8...10 мм.

Прессовку устанавливали в графитовый контейнер, оставшийся объем заполняли смесью, состоявшей из 85 % глинозема и 15 % графита. Графитовый контейнер помещали в печь. В такой защитной среде при нагревании образуется газовая атмосфера, содержащая значительное количество CO [1]. Предварительные эксперименты показали, что такая атмосфера надежно защищает спекаемые прессовки от окисления.

Температуру измеряли вольфрам-ренниевой термопарой ВР-5/20, спай которой контактировал с опытными образцами.

Процесс формирования структуры карбидочугуна, полученного методом пропитки или спекания, опреде-

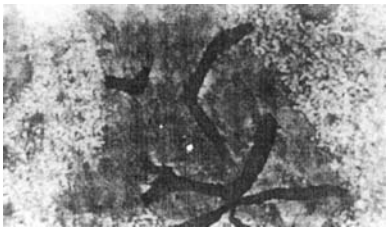

Рис. 1. Микроструктура сплава карбид титана–серый чугун, ×500

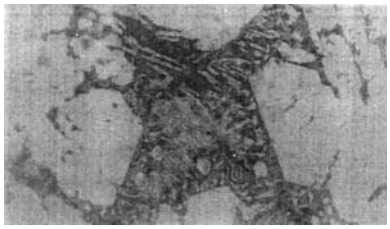

Рис. 2. Микроструктура сплава карбид титана–карбид хрома–серый чугун, ×500

ляли в основном в процессе жидкофазного спекания взаимодействием карбидной и металлической фаз. Было установлено, что в процессе спекания сплава карбид титана – серый чугун при 1430...1450 °С компоненты не растворяются друг в друге и спекаемые детали имеют низкую твердость. По микроструктуре сплава (рис. 1) видно, что в сером чугуне полностью сохраняется углерод в виде графита.

Между тем термодинамические расчеты взаимодействия карбида хрома с серым чугуном при температурах спекания показали, что эти компоненты способны отбеливать серый чугун. Экспериментальное изучение карбидочугунов системы Cr_3C_2–СЧ подтвердило сделанные расчеты. В микроструктуре образцов карбидочугунов наблюдали многочисленные участки цементита $(Fe, Cr)_3C$ в перлитной матрице. Полученные данные свидетельствуют о том, что карбидочугун приведенного состава обладал необходимой твердостью и износостойкостью. Однако образцы из такого композиционного материала после спекания не сохраняли форму и поэтому для производства износостойких деталей были не пригодны.

Экспериментальное исследование карбидочугунов системы TiC–Cr_3C_2–СЧ показало, что микроструктура этих образцов после спекания имела три структурных составляющих: карбидную, представленную многочисленными зернами карбида титана, участки цементита $(Fe, Cr)_3C$ и эвтектику α–TiC–Cr_3C (рис. 2). Кроме того, детали из карбидочугуна указанного состава хорошо сохраняли форму и размеры. Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что карбидочугун состава карбид титана–карбид хрома–серый чугун является наиболее приемлемым с точки зрения технологии производства, твердости и износостойкости.

Исследование влияния сил прессования на пористость деталей из карбидочугуна состава 30 % TiC – 10 % Cr_3C_2 – 60 % СЧ (режим спекания: $T = 1450$ °С; $\tau = 30$ мин) показало, что с увеличением силы прессования пористость уменьшается.

При силе прессования около 8 МПа пористость спеченных прессовок составляла 20...22 %; при повышении силы прессовая до 20 МПа пористость уменьшилась до 16...15 %, но при дальнейшем увеличении силы прессования пористость заметно не изменялась.

При силе прессования более 20 МПа наблюдали расслаивание прессовок при выпрессовке их из пресс-формы. Кроме этого, следует отметить, что для нормального формирования структуры карбидостали высокая плотность прессования в период жидкофазного спекания может оказаться нежелательной [2]. Объясняется это тем, что с увеличением контактной поверхности между частицами TiC и стали при температуре эвтектического взаимодействия образуется слишком много жидкой фазы, неудовлетворительно смачивающей карбид титана. В результате этого жидкая фаза выпотевает на поверхность или образцы разбухают. Подобные явления наблюдали и при спекании прессовок из карбидочугуна. Таким образом, рациональная сила прессования составляет 18...20 МПа.

Исследования зависимости пористости от состава карбидочугуна показали, что с увеличением содержания карбида титана пористость увеличивается от 16 до 40 %. Высокая пористость связана с тем, что карбид титана, как было показано, не растворяется в чугуне. Следует отметить, что при содержании карбида титана менее 30 % наблюдали некоторое искажение формы и размеров спеченных изделий. Это можно объяснить большим количеством жидкой фазы в прессовке в период спекания.

Изменение содержания карбида хрома в карбидочугуне не оказывало заметного влияния на пористость получаемых конструкционных деталей. Последнее объясняется полным растворением карбида хрома в чугуне.

При температурах 1450...1500 °С изменение формы и размеров получаемых деталей из карбидочугуна было незначительным. При температуре свыше 1500 °С наблюдали значительное искажение формы и размеров деталей. Эксперименты показали, что время выдержки не должно превышать 30 мин (при температуре спекания 1450 °С), так как в этом случае тоже происходит искажение формы и размеров.

Следует отметить, что при содержании карбида хрома более 12 % в микроструктуре карбидочугуна выпадают крупные иглы карбидов хрома Cr_7C_3.

Исследование влияния содержания карбида хрома на твердость карбидочугуна показало, что твердость карбидочугунов растет с увеличением содержания карбида хрома. При увеличении содержания карбида хрома от 5 до 15 % твердость возрастает от 35 до 50 HRC. Это связано как с увеличением количества карбидной фазы в структуре карбидочугуна, так и с изменением типа карбидов.

1. Удельная работа сопротивления износу деталей

Состав материала, % мас.	Удельная работа сопротивления износу, Дж/мг	Δ, Дж/мг	*E*, %
30 TiC – 10 Cr_3C_2 – 60 СЧ	10,25	0,57	5,6
40 TiC – 60 СЧ	4,25	0,29	6,8

Исследования по определению удельной работы сопротивления износу образцов карбидочугуна состава 30 % TiC – 10 % Cr_3C_2 – 60 % СЧ показали, что износостойкость этого карбидочугуна превосходит более чем в 2 раза износостойкость образцов карбидочугуна состава 40 % TiC – 60 % СЧ (табл. 1). Такие высокие показатели износостойкости и твердости деталей из карбидочугуна состава TiC–Cr_3C_2–СЧ по сравнению с карбидочугуном состава TiC–СЧ обусловлены микроструктурами данных композиционных материалов.

Таким образом, наилучшим материалом для износостойких деталей машин является карбидочугун состава карбид титана–карбид хрома–серый чугун. Оптимальный состав карбидочугуна этой системы следует искать в пределах % мас.: 30...50 карбид титана, 5...15 карбид хрома, серый чугун – остальное. Оптимальные режимы спекания следует искать в пределах: температура спекания 1450...1500 °С, время выдержки 10...30 мин. Оптимальная сила прессования составляет 18...20 МПа.

Результаты исследования позволили разработать технологию производства износостойких деталей из карбидочугуна состава карбид титана–карбид хрома–серый чугун.

Первый этап заключался в приготовлении шихты карбидочугуна. Порошки серого чугуна и карбидов смешивали в соотношении, % мас.: 30 карбид титана – 10 карбид хрома – 60 серый чугун в смесителе типа "пьяная бочка" в течение 12 ч. Затем, после добавления 2 % глицерина (пластификатора), смесь перемешивали еще 3 ч.

Второй этап заключался в прессовании полученной смеси в брикеты. Схема прессования односторонняя, давление прессования 16...20 МПа.

На третьем этапе для удаления пластификатора из состава прессовок их высушивали в вакуумном шкафу (остаточное давление 1,3 Па) в течение 2–3 ч при температуре 80...100 °С.

Следующим этапом изготовления деталей являлось их спекание. График нагрева соответствовал следующему режиму: температура спекания T = = (1450±20) °С, время выдержки τ = (25±2) мин. Для защиты прессовок от окисления оставшийся объем контейнера, в котором спекали заготовки, заполняли защитной средой: 85 % Al_3O_3 + 15 % $C_{гр}$. Заготовки остывали в контейнере.

Для уменьшения сил трения при эксплуатации деталей из карбидочугуна в условиях сухого трения качения их пропитывали маслом в резервуаре в течение 30...40 мин.

2. Механические свойства карбидочугуна состава, % мас.: 30 TiC – 10 Cr_3C_2 – 60 СЧ

Параметр	Перед закалкой	После закалки	После отпуска
HRC	45...49	46...49	45...49
Прочность при сжатии, МПа	760...820	700...770	740...800

Механические свойства карбидочугуна изучали на цилиндрических образцах ∅8×10 мм (табл. 2). Перед механическими испытаниями образцы шлифовали с двух сторон.

Режимы термообработки карбидочугуна соответствовали режимам термообработки металлической составляющей, т.е. хромистому белому чугуну. Температура под закалку составляла 900...950 °С. Охлаждающая среда – масло. Режим отпуска также соответствовал отпуску белых хромистых чугунов, температура которого составляла 500 °С.

Особых изменений в микроструктуре термообработанных образцов из карбидочугуна не наблюдали. Из табл. 2 следует, что показатели твердости и прочности карбидочугуна несколько ниже, чем у карбидосталей [3], но достаточно высокие. Наряду с этим следует отметить, что склонность к отпуску карбидосталей в результате их нагрева до 500 °С приводит к падению твердости от 64 до 42 HRC. В отличие от карбидосталей стойкость карбидочугунов к нагреву до 500 °С и выше нечувствительна. Это позволяет сделать вывод о работоспособности деталей из карбидочугуна при более высоких температурах.

По приведенной технологии изготовили втулки к правильно-отрезным автоматам И6022А-01, предназначенным для правки и резки арматурных прутков периодического профиля.

Промышленные испытания показали, что втулки из стали 45, ранее применявшиеся на заводе, имели стойкость не более 35 ч работы. Эксплуатация втулок из карбидочугуна показала, что их стойкость возросла по сравнению со втулками из стали 45 в 30...35 раз и составила 1000...1200 ч работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гуревич Ю.Г., Акименко В.Б., Фраге Н.Р., Савиных Л.М.** Износостойкий материал на основе карбида титана для работы в узлах трения // Сталь. 1981. № 10. С. 77–78.

2. **Роговой Ю.И.** К разработке износостойкого материала карбид титана – сталь // Порошковая металлургия. 1985. № 8.

3. **Гуревич Ю.Г., Нарва В.К., Фраге Н.Р.** Карбидостали. М.: Металлургия, 1988. 142 с.

Юрий Григорьевич Гуревич, д-р техн. наук

Единая система защиты от коррозии и старения. Алюминий, магний и их сплавы. Методы ускоренных коррозионных испытаний по ГОСТ 9.913–90

ГОСТ 9.913–90 распространяется на алюминий, магний и их сплавы без защитных покрытий и устанавливает методы ускоренных и имитационных коррозионных испытаний (далее – испытаний) для получения сравнительных данных по коррозионной стойкости металлов и сплавов.

Методы испытаний не предназначены для определения сроков службы металлов и сплавов при эксплуатации.

Общие требования к проведению испытаний – по ГОСТ 9.905.

1. Общие положения

1.1. Испытания проводят в искусственно создаваемых условиях, имитирующих воздействие климатических факторов атмосферы.

Методы испытаний и их применение указаны в табл. 1.

1.2. Испытания проводят по программе, в которой указывают химический состав сплава, термическую обработку, механические свойства, геометрические размеры образца или детали, состояние поверхности, маркировку, метод испытаний, продолжительность испытаний, график промежуточных осмотров, количество снимаемых образцов, критерии и способы оценки результатов испытаний.

2. Отбор образцов

2.1. Вид, форму и размеры образцов выбирают в зависимости от цели испытаний. Допустимая погрешность размеров образцов ±0,1 мм. Толщина образцов от 0,5 до 3,0 мм, при этом образцы не должны деформироваться в течение испытания.

Испытания проводят на образцах одинаковой формы и размеров, одного направления вырезки по отношению к ориентированию волокна или кристаллизации литья, или деформации заготовки и одного способа подготовки поверхности.

2.2. Для оценки коррозионной стойкости по изменению химических свойств при растяжении применяют пластины размерами 220×150×(толщина образца) мм, из которых после коррозионных испытаний вырезают образцы для определения механических свойств по ГОСТ 1497.

При оценке зависимости коррозионной стойкости образцов от технологии их изготовления (отливка, штамповка, прессовка и т.д.) применяют образцы круглой формы диаметром 5...25 мм или прямоугольной формы размерами 30×15 мм и толщиной 1...5 мм.

Допускается применять образцы других размеров и формы в целях определения типа коррозии, глубины коррозионных поражений или потери массы.

2.3. Параметр шероховатости обработанной поверхности *Ra* по ГОСТ 2789 должен быть не более 2,5 мкм, необработанной поверхности – соответство-

1. Методы испытаний и их применение

Метод испытаний	Материал	Условия эксплуатации по ГОСТ 15150	Назначение
Полное погружение в раствор, содержащий 3 % хлористого натрия и 0,1 % перекиси водорода	Алюминий и его сплавы	М	Имитация воздействия морского климата при периодическом или постоянном контакте с морской водой
Полное погружение в 3 %-ный раствор хлористого натрия	Магний и его сплавы		
Воздействие нейтрального соляного тумана	Алюминий, магний и их сплавы	ТМ, В, ОМ	Имитация воздействия тропического климата, включая морской туман
Переменное погружение в 3 %-ный раствор хлористого натрия	Алюминий и его сплавы	У, УХЛ, О	Имитация воздействия умеренного климата с воздействием и без воздействия хлоридов
Переменное погружение в 0,001 %-ный раствор хлористого натрия	Магний и его сплавы		
Воздействие влаги при периодической конденсации, повышенных значениях относительной влажности и температуры	Алюминий, магний и их сплавы	Т, ТС, ТВ	Имитация воздействия тропического климата, включая атмосферные осадки

вать требованиям стандартов и другой нормативно-технической документации на полуфабрикаты или детали.

При механической обработке образцов не допускается применять смазки и эмульсии, а также местные нагревы.

2.4. На поверхности образцов не должно быть видимых дефектов (царапин, включений, трещин, точек, пор).

2.5. Число параллельно испытываемых образцов должно быть не менее пяти на каждый вариант, контрольных – не менее трех.

За вариант принимают совокупность образцов с идентичными параметрами, изготовленных из одного металла или сплава.

2.6. Общее число образцов устанавливают в зависимости от общей продолжительности испытаний, числа промежуточных съемов, количества образцов, снимаемых с испытаний, и контрольных образцов.

2.7. Контрольные образцы и образцы, снятые с испытаний, хранят в условиях, исключающих возникновение и развитие коррозии в соответствии с требованиями ГОСТ 9.909.

2.8. Для размещения образцов в аппаратуре допускается сверлить отверстия на их углах или кромках.

2.9. Кромки образцов и края отверстий не должны иметь заусенцев.

2.10. Для маркировки образцов применяют клеймение или нанесение краски в местах, не влияющих на оценку испытаний.

Допускается применять ярлыки из коррозионно-стойкого материала с нанесенной маркировкой.

3. Аппаратура и реактивы

3.1. Камеры, емкости и другая испытательная аппаратура, а также приспособления для крепления образцов должны быть стойкими к возникновению коррозионной среды и не влиять на результаты испытаний.

3.2. Конструкция камеры должна обеспечивать стабильный режим работы, колебания температуры не должны превышать ±2 °С, если иное не предусмотрено программой испытаний.

3.3. Для подготовки коррозионной среды применяют химические реактивы классификации ч. д. а. или х. ч. и дистиллированную воду по ГОСТ 6709.

4. Подготовка к испытаниям

4.1. Образцы из алюминия и его сплавов обезжиривают органическими растворителями (например, нефрасом по ТУ 38.401-67-108), затем травят в 5...10 %-ном растворе едкого натрия по ГОСТ 2263 в течение 50...60 мин и промывают в проточной воде. После этого осветляют в 25...30 %-ном растворе азотной кислоты по ГОСТ 4461 в течение 2...6 мин, вновь промывают в проточной воде, а затем дистиллированной воде и высушивают фильтровальной бумагой по ГОСТ 12026.

Операцию травления допускается исключать, если это предусмотрено в программе испытаний, например, при исследовании плакированных образцов, влияния шероховатости поверхности образцов и поверхностных дефектов на коррозионную стойкость металлов.

4.2. Перед постановкой на испытания образцы осматривают и протирают марлевым тампоном, смоченным этиловым спиртом марки А по ГОСТ 17299.

4.3. Образцы из магния и его сплавов зачищают шкуркой из белого электрокорунда марки 24А зернистостью 40-Н по ГОСТ 5009, затем протирают марлевым тампоном, смоченным этиловым спиртом марки А по ГОСТ 17299 и, при необходимости, взвешивают на аналитических весах по ГОСТ 24104*.

4.4. Для удаления плен, налетов, включений допускается травление образцов из деформируемых магниевых сплавов в 5...7 %-ном растворе азотной кислоты по ГОСТ 4461 при температуре 18...25 °С в течение 1...2 мин с последующей обработкой в растворе, состав которого приведен в табл. 2.

2. Состав раствора, температура и продолжительность обработки

Состав раствора		Температура, °С	Продолжительность обработки, мин
Компонент	Концентрация, г/дм^3		
Хромовый ангидрид по ГОСТ 2548	80...100	18...25	0,5...1,0
Азотнокислый натрий по ГОСТ 828	5...8		

После этого образцы промывают в проточной, а затем дистиллированной воде и высушивают в сушильном шкафу при температуре 70 °С в течение 10 мин, при температуре 100 °С – 5 мин. Далее проводят операции по п. 4.3.

4.5. Образцы размещают в аппаратуре в соответствии с требованиями ГОСТ 9.905.

5. Проведение испытаний

5.1. Метод испытания алюминия и его сплавов при полном погружении в электролит с добавлением перекиси водорода

5.1.1. Сущность метода заключается в ускорении коррозионного процесса при полном погружении об-

* С 1 июля 2002 г. введен в действие ГОСТ 24104–2001 (здесь и далее).

разцов при температуре 18...25 °С в 3 %-ный раствор хлористого натрия по ГОСТ 4233 с добавлением перекиси водорода по ГОСТ 10929.

5.1.2. Испытания проводят в емкостях вместимостью 3000...10 000 дм^3 по ГОСТ 25336.

5.1.3. Объем испытательного раствора должен составлять 10 см^3 на 1 см^2 поверхности образца.

Не допускается испытывать в одной емкости образцы из разных марок алюминиевых сплавов.

5.1.4. Продолжительность испытаний – 90 сут.

Допускается для сплавов, стойких к воздействию коррозионной среды, увеличивать продолжительность испытаний до 180 сут, для сплавов менее стойких – уменьшать до 15...30 сут.

5.1.5. В испытательный раствор один раз в пять дней добавляют 0,1 %-ный раствор перекиси водорода по ГОСТ 10929.

5.1.6. Раствор заменяют по мере его загрязнения продуктами коррозии (помутнение, выпадение осадка), но не реже чем через 15 сут.

5.2. Метод испытания магния и его сплавов при полном погружении в электролит

5.2.1. Сущность метода заключается в ускорении коррозионного процесса при полном погружении образцов при температуре 18...25 °С в 3 %-ный раствор хлористого натрия по ГОСТ 4233.

5.2.2. Испытания проводят в емкостях по п. 5.1.2.

5.2.3. Объем раствора должен составлять 50 см^3 на 1 см^2 поверхности образца.

Не допускается испытывать в одной емкости образцы из разных марок магниевых сплавов.

5.2.4. Продолжительность испытаний – 1...2 сут.

5.2.5. В процессе испытаний раствор не меняют.

5.2.6. Сплавы марок МЛ5пч по ГОСТ 2856 допускается испытывать по ускоренной методике, приведенной ниже.

5.3. Метод испытаний алюминия, магния и их сплавов при воздействии нейтрального соляного тумана

5.3.1. Сущность метода заключается в ускорении коррозионного процесса повышением температуры, относительной влажности и введением в атмосферу раствора хлористого натрия.

5.3.2. Испытания проводят распылением 5 %-ного раствора хлористого натрия по ГОСТ 4233 при температуре (35±2) °С и относительной влажности 95...98 % в течение 3 мин через каждые 20 мин испытания.

5.3.3. Для проведения испытаний применяют аппаратуру по ГОСТ 9.308.

5.3.4. При осмотре образцов фиксируют начало появления коррозионных очагов.

5.3.5. Продолжительность испытаний для алюминия и его сплавов – 90...360 сут. Периодичность осмотров и съемов образцов с испытаний 1, 2, 4, 8 сут и т.д., 3, 6, 12 мес и т.д.

5.3.6. Продолжительность испытаний для магния и его сплавов – 60...90 сут. Периодичность осмотров и съемов образцов с испытаний 1, 3, 5, 15, 30, 45, 60, 90 сут.

5.4. Метод испытаний алюминия и его сплавов при переменном погружении в электролит

5.4.1. Сущность метода заключается в ускорении коррозионного процесса чередованием погружения образцов при температуре 18...25 °С в 3 %-ный раствор хлористого натрия по ГОСТ 4233 и высушивании их на воздухе.

5.4.2. Продолжительность пребывания образцов в растворе 10 мин, на воздухе – 50 мин. Во время вынужденных перерывов (до 8 ч в течение суток) в испытаниях образцы должны находиться на воздухе.

5.4.3. Для проведения испытаний применяют температуру по ГОСТ 9.308.

5.4.4. Осмотр образцов проводят ежедневно и фиксируют время появления коррозионных очагов.

5.4.5. Продолжительность испытаний – 90 сут. Допускается увеличивать продолжительность испытаний до 180, 270 и 360 сут.

5.4.6. Замена раствора – по п. 5.1.6.

5.5. Метод испытаний магния и его сплавов при полном погружении в электролит

5.5.1. Сущность метода заключается в ускорении коррозионного процесса чередованием погружения образцов при температуре 18...25 °С в 0,001 %-ный раствор хлористого натрия по ГОСТ 4233 и высушиванием их на воздухе.

5.5.2. Продолжительность пребывания образцов в растворе и на воздухе – по п. 5.4.2.

5.5.3. Аппаратура, применяемая для испытания – по п. 5.4.3.

5.5.4. Осмотр образцов проводят через 5, 15, 30, 60, 90, 120 и 180 сут. Допускается увеличивать продолжительность испытания до 360 сут.

5.5.5. Замена раствора – по п. 5.1.5.

5.5.6. Уровень раствора поддерживают постоянным, добавляя дистиллированную воду.

5.6. Метод испытаний алюминия, магния и их сплавов при повышенных значениях относительной влажности воздуха и температуры с периодической конденсацией влаги

5.6.1. Сущность метода заключается в ускорении коррозионного процесса повышением относительной влажности воздуха и температуры с периодической конденсацией влаги.

5.6.2. Аппаратура, применяемая для испытаний – по ГОСТ 9.308.

5.6.3. Испытания являются циклическими с непрерывным следованием циклов продолжительностью 24 ч каждый. Число циклов устанавливают в программе испытаний.

5.6.4. Цикл состоит из двух этапов:

1-й этап – испытания при температуре (55±2) °С и относительной влажности воздуха 95...98 % в течение 8 ч.

2-й этап – испытания при температуре 18...25 °С и относительной влажности воздуха 95...98 % в течение 16 ч включая период охлаждения.

3. Растворы для удаления продуктов коррозии

Назначение раствора	Состав раствора			Режим травления	
	Компонент	Концентрация		Температура, °С	Продолжительность, мин
		г/дм^3	см^3/дм^3		
Для алюминия и его сплавов	Кислота ортофосфорная (ρ = 1,59 г/см^3) по ГОСТ 10678	–	50	80...85	5...10
	Ангидрид хромовый по ГОСТ 2548	200	–		
	Кислота азотная (ρ = 1,41 г/см^3) по ГОСТ 4461	–	300	18...25	10...20
Для магния и его сплавов	Ангидрид хромовый по ГОСТ 2548	200	–	18...25	1...5

5.6.5. При осмотре образцов фиксируют начало появления коррозионных очагов.

5.6.6. Продолжительность испытаний – 180 сут. Периодичность осмотров и съемов образцов с испытаний устанавливают в программе испытаний.

6. Удаление продуктов коррозии

6.1. Перед проведением оценки коррозионных испытаний с поверхности образцов удаляют продукты коррозии химическим методом по ГОСТ 9.907.

Растворы для удаления продуктов коррозии приведены в табл. 3.

6.2. Перед удалением с поверхности образцов продуктов коррозии проверяют влияние свежеприготовленного раствора на растворение металла. Контрольный образец взвешивают и погружают на 1...5 мин в раствор. Образец массой менее 200 г взвешивают с погрешностью ±0,0001 г, более 200 г – ±0,01 г. Если масса образца изменяется, проверяют реактивы на соответствие требованиям стандартов и при необходимости меняют.

6.3. После удаления продуктов коррозии образцы промывают в проточной, а затем дистиллированной воде, высушивают в сушильном шкафу при температуре (100±2) °С в течение 3...5 мин, выдерживают в эксикаторе над сушителем в течение 24 ч и взвешивают.

6.4. Результаты взвешивания заносят в сводную таблицу результатов испытаний.

7. Оценка результатов испытаний

7.1. Оценку результатов испытаний проводят в соответствии с видом коррозии и выбранным критерием:

изменение внешнего вида поверхности образцов;

изменение по глубине и количеству коррозионных поражений;

изменение механических свойств;

изменение массы;

количество выделившегося водорода;

изменение глубины и характера коррозионных поражений (металлографический метод).

7.2. Способ оценки результатов испытаний выбирают в зависимости от требований, предъявляемых к материалу, метода испытаний и устанавливают в программе испытаний.

7.3. Результаты испытаний заносят в сводную таблицу результатов испытаний.

7.4. Оценка по изменению внешнего вида (визуальный контроль)

7.4.1. Визуальный контроль проводят при естественном или искусственном освещении. Освещенность должна быть не менее 300 лк при применении ламп накаливания и не менее 500 лк при применении люминесцентных ламп. Допускается использовать лупы с увеличением до 5$^\times$ по ГОСТ 25706.

Сводная таблица результатов испытаний

Маркировка образца	Полуфабрикат	Режим термической обработки	Продолжительность испытания, ч	Размеры образца, мм	Площадь образца, мм^2	Количество очагов коррозии, шт	Размер очага коррозии, мм	Предел прочности образца, МПа		Относительное удлинение образца, %		Потери, %		Масса образца, г		Потеря массы образца, г/м^2	Скорость коррозии, г/(см^2·сут)	Металлографический метод		Неразрушающий метод	Количество выделившегося водорода, с^3/см^2
								до испытания	после испытания	до испытания	после испытания	предела прочности	удлинения	до испытания	после испытания			Характер коррозии	Глубина коррозии		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22

7.4.2. После удаления продуктов коррозии определяют количество очагов коррозии на единицу площади и размер коррозионных очагов.

7.5. Оценка по глубине и количеству коррозионных поражений – по ГОСТ 9.908.

7.6. Оценка по изменению механических свойств

7.6.1. Изменение механических свойств металлов (предел прочности $\sigma_в$ и относительное удлинение δ) определяют сравнением указанных свойств до и после испытаний.

7.7. Оценка по изменению массы

7.7.1. Результаты испытаний оценивают взвешиванием образцов на аналитических весах по ГОСТ 24104 с погрешностью не более ±0,002 г до и после испытаний, предварительно удалив с поверхности образца продукты коррозии и выдержав их в эксикаторе с осушителем в течение 24 ч.

7.7.2. Потерю массы Δm, г/м^2, вычисляют по формуле

$$\Delta m = \frac{m_0 - m_1}{S}, \qquad (1)$$

где m_0 – масса образца до испытания, г; m_1 – масса образца после испытания и удаления продуктов коррозии, г; S – площадь поверхности образца, м^2.

7.7.3. Скорость коррозии К, г/(м^2·сут), вычисляют по формуле

$$K = \frac{\Delta m}{\tau}, \qquad (2)$$

где τ – продолжительность испытаний, сут.

7.8. Оценка по количеству выделившегося водорода (объемный метод)

7.8.1. Результаты испытаний оценивают по водородному показателю коррозии, отнесенному к единице первоначальной поверхности образца и выражают в см^3/(см^2·сут).

7.8.2. Оценку коррозионной стойкости сплава марки МЛ5пч по ГОСТ 2856 по количеству выделившегося водорода проводят экспресс-методом, приведенным ниже.

7.9. Оценка по изменению глубины и характера коррозионных поражений (металлографический метод)

7.9.1. Оценку проводят по ГОСТ 9.908.

7.9.2. Для оценки распространения коррозии по зерну алюминия и его сплавов шлифы травят в растворе состава:

кислота азотная (ρ = 1,41 г/см^3) по ГОСТ 4461, 70 %-ный раствор – 2,5 см^3;

кислота соляная (ρ = 1,19 г/см^3) по ГОСТ 857 – 1,5 см^3;

кислота фтористоводородная (ρ = 1,14 г/см^3) по ГОСТ 2567, 40 %-ный раствор – 1,0 см^3;

вода дистиллированная – 95,0 см^3.

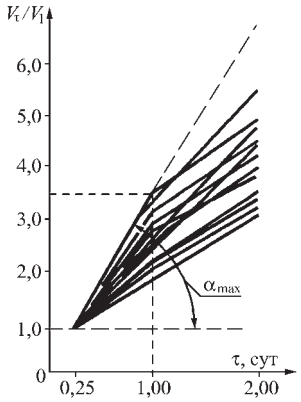

Рис. 1. Зависимость $f(\tau) = V_\tau/V_1$

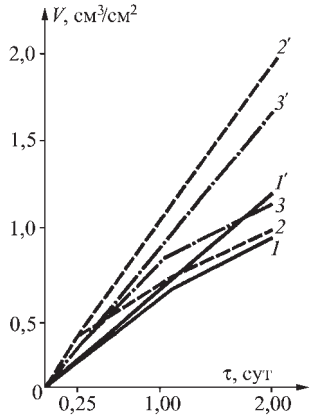

Рис. 2. Кривые зависимости $f(\tau) = V$:
1, *2*, *3* – при τ = 48 ч; *1′*, *2′*, *3′* – при τ = 6 ч

7.9.3. Для выявления микроструктуры магния и его сплавов применяют растворы по нормативно-технической документации.

Экспресс-метод оценки коррозионной стойкости сплава марки МЛ5пч по количеству выделившегося водорода

1. Ускоренную оценку коррозионной стойкости сплава марки МЛ5пч по ГОСТ 2856 проводят по количеству водорода, выделившегося при 6-часовых испытаниях при полном погружении образцов в 3 %-ный раствор хлористого натрия.

Результаты испытаний, полученные по количеству водорода, выделившегося при 6-часовых испытаниях, приводят к результатам 2-суточных испытаний по формуле

$$V = \frac{V_1 K}{S}, \qquad (3)$$

где V – объем водорода, выделившегося с единицы поверхности образца при 2-суточных испытаниях, вычисленный по результатам 6-часовых испытаний, см^3/см^2; V_1 – объем водорода, выделившегося при 6-часовых испытаниях, см^3; K – коэффициент перевода результатов 6-часовых испытаний к результатам 2-суточных испытаний, равный 7; S – площадь поверхности образца, см^2.

2. Коэффициент перевода K вычисляют на основе экспериментальных данных различных плавок и представляет тангенс угла наклона прямой, определяющей зависимость роста относительного объема, выделившегося водорода V_τ, см^3, от времени испытаний (τ = 6, 24, 48 ч) (рис. 1)

$$f(\tau) = \frac{V_\tau}{V_1}. \qquad (4)$$

За коэффициент перевода принимают максимальный из вычисленных коэффициентов

$$K_{\max} = \mathrm{tg}\alpha_{\max} \approx 3{,}3 \text{ сут}^{-1}; \quad (5)$$

$$K = 2K_{\max} \approx 6{,}6 \approx 7, \quad (6)$$

где 2 – число суток испытаний.

3. Скорость коррозии магниевых сплавов в 3 %-ном растворе хлористого натрия снижается.

При вычислении коэффициента перевода предполагается линейный рост объема выделившегося водорода с течением времени, т.е. после 6-часовых испытаний скорость коррозии остается постоянной.

Количество водорода, выделившегося с единицы поверхности образца за 2 сут, вычисленное по ускоренной методике при 6-часовых испытаниях, всегда больше количества водорода, выделившегося с единицы поверхности образца при 2-суточных испытаниях. Полученная разность составляет запас надежности испытаний по ускоренной методике (рис. 2).

Партию сплавов считают годной, если при испытании образцов в 3 %-ном растворе хлористого натрия по ГОСТ 4233 количество выделившегося водорода, вычисленное по формуле (3), не превышает 8 см^3/см^2 для образцов, термически обработанных по режиму Т4, и не превышает 4 см^3/см^2 для термически необработанных образцов по ГОСТ 2856.

Если после 6-часовых испытаний вычисленное количество водорода превышает допускаемое значение, испытания необходимо продолжить до 2 сут.

При неудовлетворительных результатах оценки при 2-суточных испытаниях допускается повторное испытание на образцах, вырезанных из выпоров и отливок, по усмотрению завода-поставщика.

При неудовлетворительных результатах повторной оценки всю партию сплавов данного тигля бракуют.

Поздравляем!

Анатолия Ивановича Капустина

кандидата технических наук

с 75-летием

Анатолий Иванович родился 9 сентября 1932 г. в Ленинграде.

После окончания школы закончил Ленинградский военно-механический институт. Затем работал на заводе им. К. Либнехта, пройдя путь от помощника мастера до главного технолога завода.

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

Анатолий Иванович является одним из крупнейших технологов в области заготовительных производств, имеет большое количество опубликованных работ и изобретений. С начала основания нашего журнала А.И. Капустин является членом редакционного совета и ведет активную работу.

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

Коллектив редакции и редакционная коллегия поздравляют Анатолия Ивановича Капустина с юбилеем! Желаем здоровья, благополучия, дальнейших творческих успехов на благо нашей Родины!

Р.А. Закиров
(ОАО "Уральская кузница", г. Чебаркуль)

Экспериментальное исследование разделения круглого сортового проката плоскими клиновыми ножами

Приведено описание опытной установки, предназначенной для получения мерных заготовок из круглого сортового проката. Представлены результаты экспериментальных исследований энергосиловых параметров процесса и качества получаемых изделий.

The description of pilot unit designed for the production of measured billets from rolled section is given. The results of experimental investigation of process energy-power parameters and quality of production obtained are shown.

Важнейшей операцией в прокатном и кузнечно-штамповочном производстве является операция получения заготовок мерной длины. Известно много способов разделения сортового проката, их можно разделить на две группы.

В первую входят безотходные способы, в основе которых лежит сдвиг разделяемых частей исходной заготовки. Ко второй группе относятся способы, основанные на удалении тем или иным образом слоя металла из зоны реза. Первая группа относится к материалосберегающим, высокопроизводительным и более экономичным способам.

Анализ разделительных процессов показал, что наряду с широко применяемыми в промышленности известны перспективные способы, пока не получившие должного развития. Эти способы недостаточно изучены, отсутствуют работоспособные конструкции деформирующих устройств, не определены рациональные области их применения.

К их числу относится способ разделения круглого сортового проката клиновыми ножами, совершающими тангенциальное движение относительно заготовки. В ходе деформации заготовка получает вращение вокруг своей оси при одновременном смещении разделяемых частей в плоскости реза, причем разделение должно завершиться при повороте заготовки на угол, не превышающий 180°. Достаточно подробно теоретическое исследование этого процесса и разработанные конструкции устройств изложены в работах [1–4].

Ниже приведены результаты экспериментальных исследований, проведенных для определения энергосиловых характеристик процесса, условий работы установки и оценки качества получаемых заготовок.

Исследования проводили на опытной установке в цехе № 27 ОАО "Уральская кузница" (г. Чебаркуль). Принципиальная схема установки приведена на рис. 1. На рис. 2 представлен общий вид установки с гидростанцией.

Установка включает привод, выполненный в виде гидроцилиндра *1*, деформирующий инструмент *2*, *3* с рабочими *4*, *5* и соответствующими им прижимными плоскостями *6*, *7* для прижима прутка и отрезаемой заготовки, выполненные в виде выступов за одно целое с деформирующим инструментом, который перемещается в направляющих *8* и *9*. Синхронное и взаимосвязанное перемещение ножей осуществляется за счет оснащения их зубчатыми рейками *10*, которые связаны между собой шестерней *11*. Установка рассчитана на отрезку мерных заготовок из прутка диаметром до 40 мм, длиной от 0,3 диаметра. Габаритные размеры установки в плане 525×440 мм, высота 1070 мм.

Замер энергосиловых параметров осуществляли методом тензометрирования, для чего установка была оснащена датчиками и необходимой тензометрической аппаратурой.

В процессе эксперимента проводили разделение прутков круглого сечения семи марок сталей. При этом варьировали диаметром заготовок, температурой обработки и конструкцией используемых ножей.

Исследования показали, что при постоянной скорости деформирования форму и величину кривой сила–перемещение ножей

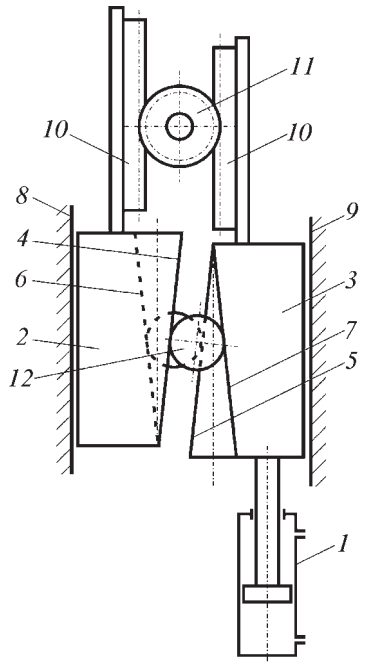

Рис. 1. Принципиальная схема установки

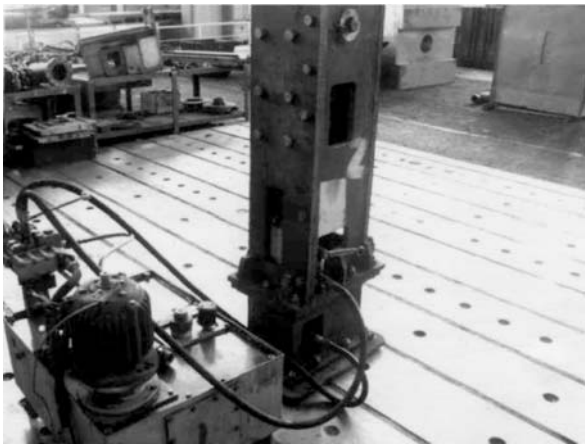

Рис. 2. Общий вид установки с гидростанцией

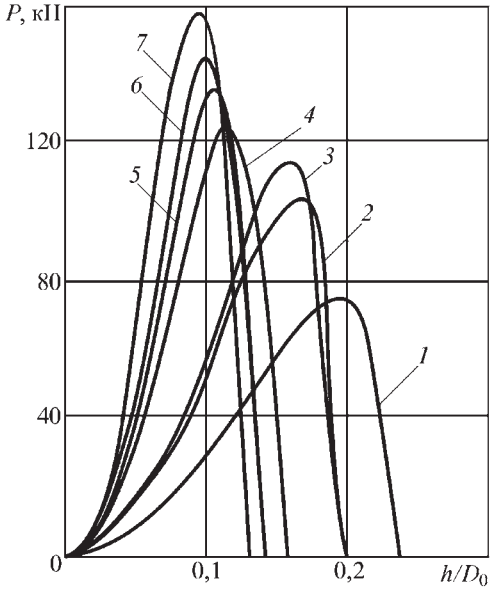

Рис. 3. Графики сила отрезки P – отношение h/D_0 при разделении проката в холодном состоянии для сталей:
1 – 20; *2* – 45; *3* – 40; *4* – 60; *5* – 65Г; *6* – 40Х; *7* – 40ХН2МА

определяют характеристика прочности разрезаемого проката, размер его поперечного сечения, температура предварительного нагрева заготовки и угол наклона режущих кромок ножей. На рис. 3 и 4 приведены графики сила отрезки P – отношение h/D_0 (h – ход ножа; D_0 – исходный радиус заготовки), полученные при разделении заготовок в холодном и нагретом состоянии.

В момент достижения силой отрезки максимального значения, что соответствует предельной степени пластической деформации, происходит ее резкое падение в результате хрупкого разрушения (скола) разделяемого прутка. При этом шток рабочего цилиндра гидропривода испытывает нагрузку, обратную по знаку технологической силе отрезки. Такое явление действительно имеет место. Однако динамические нагрузки в исследуемой установке не превышают 7 % от технологической силы, в то время как при резке в штампах или на сортовых ножницах они могут составлять 20...25 % и более [5].

На рис. 5 показана поверхность прутка, получаемая при разделении по исследуемой схеме и при открытой отрезке обычным сдвигом. Сравнение показало, что в первом случае искажение формы заметно меньше. Это подтверждают и данные замеров, приведенные в таблице.

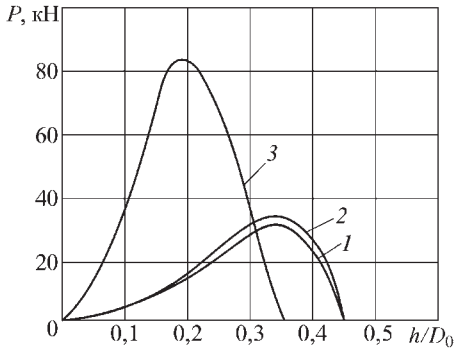

Рис. 4. Графики сила отрезки P – отношение h/D_0 при разделении проката в нагретом состоянии (T = 500 °С) для сталей:
1 – 20; *2* – 45; *3* – 18ХНТ

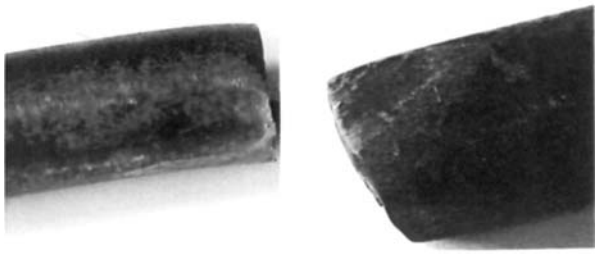

Рис. 5. Поверхность прутка:
а – для исследуемой схемы отрезки; *б* – при открытой отрезке сдвигом

Результаты приведенных исследований подтвердили эффективность использования рассматриваемого способа для получения мерных заготовок из круглого проката и послужили базой для создания опытно-промышленной установки, предназначенной для разделения проката диаметром 40...100 мм.

Результаты замеров

Показатель	Открытая отрезка	
	на опытной установке	обычным сдвигом
Утяжка, мм:		
продольная	12*/0,85	14/0,93
поперечная	1,5/0,1	3,0/0,2
Вмятина, мм:		
продольная	10/0,66	12/0,8
поперечная	0,5/0,03	1,5/0,1
Угол скоса торца, °	14/–	23/–
Ширина пластического пояска, мм	4,0/–	3,0/–
Овальность торца	–/0,06	–/0,13

*В числителе указано абсолютное значение, а в знаменателе – относительное значение.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Трусковский В.И., Закиров Р.А.** Развитие и совершенствование способов и механических схем резки // Наука и технологии. Сер. "Технологии и машины обработки давлением: избранные тр. Российской школы. М.: РАН, 2005. С. 129–134.

2. **Закиров Р.А., Трусковский В.И., Ческидов П.А. и др.** Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния проката в очаге деформации при резке плоскими клиновыми ножами // Сб. науч. тр. "Кузнечно-штамповочное производство: перспективы и развитие". Екатеринбург, 2005. С. 153–156.

3. **Пат. 2290281 РФ.** Ножницы для резки заготовок круглого сечения / В.И. Трусковский, Р.А. Закиров. № 2005119351/02; заявл. 21.06.05; опубл. 27.12.06, Бюл. № 36.

4. **Пат. 2283732 РФ.** Ножницы для резки заготовок круглого сечения / Р.А. Закиров. № 2005123270/02; заявл. 21.07.05; опубл. 20.09.06; Бюл. № 26.

5. **Трусковский В.И., Иванов С.К., Черников А.Д.** Повышение надежности работы пресс-ножниц // Кузнечно-штамповочное производство. 1980. № 12. С. 26–28.

Рамиль Агзамович Закиров, ген. директор

Памяти Александра Захаровича Журавлёва (24.12.1909–4.07.2007)

Ушел из жизни профессор кафедры «Машины и технология обработки металлов давлением», старейший работник Донского государственного технического университета, Почетный профессор университета, доктор технических наук Александр Захарович Журавлёв.

А.З. Журавлёв являлся известным ученым в области объемной штамповки. В 1948 г. он защитил кандидатскую диссертацию, в 1969 г. – докторскую диссертацию. В 1970 г. ему присвоено звание профессора.

Более 35 лет А.З. Журавлёв заведовал кафедрой «МиТОМД». Под его руководством происходило становление кафедры и ее оснащение уникальным оборудованием. В 1970-е годы им при кафедре создан научно-исследовательский отдел, успешно решавший проблемы предприятий различных отраслей промышленности в области обработки давлением.

Под руководством А.З. Журавлёва были защищены более 20 кандидатских диссертаций, а кафедрой подготовлено более трех тысяч специалистов, среди которых руководители предприятий и главные специалисты.

Он опубликовал 250 научных и учебно-методических трудов, в числе которых три монографии, учебные пособия, десятки авторских свидетельств на изобретения.

Александр Захарович Журавлёв – участник Великой Отечественной войны. Он прошел ее, начиная лейтенантом – командиром огневого взвода в Крыму, и закончив в Австрии майором – заместителем командира дивизии. За боевые заслуги и доблестный труд он был награжден орденом Красного Знамени, Отечественной войны I и II степени и 10 медалями.

А.З. Журавлёв 15 лет руководил НТО Машпром Ростовской области, был членом Совета по защите докторских диссертаций в г. Краматорске, председателем Совета по защите кандидатских диссертаций в Ростовском-на-Дону институте сельхозмашиностроения.

Александр Захарович всю жизнь был предан науке, делу воспитания студенческой молодежи и научных кадров. Коллеги и ученики профессора А.З. Журавлёва глубоко скорбят о его кончине.

Память об Александре Захаровиче Журавлёве навсегда сохранится в наших сердцах!

Ректорат Донского государственного технического университета, коллектив кафедры «Машины и технология обработки металлов давлением», редакция и редакционный совет журнала «Заготовительные производства в машиностроении»

Ордена Трудового Красного Знамени ОАО "Издательство **"Машиностроение"**,
107076, Москва, Стромынский пер., 4/1, стр. 3
Учредитель ООО "Издательство Машиностроение – 1".
E-mail: zpm@mashin.ru
Телефоны редакции журнала: (495) 268-47-19, 268-36-54, 268-69-19. **http://www.mashin.ru**
Дизайнер *Погорелова Т.Н.* Технический редактор *Тупталов С.Ю.* Корректоры *Сажина Л.И., Сонюшкина Л.Е.*
Сдано в набор 28.06.07 г. Подписано в печать 20.08.07 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 8,37 (в т.ч. вкл. 0,75). Заказ 125. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ОАО "Издательство "Машиностроение".
Отпечатано в ООО "Подольская Периодика". 142110, Московская обл., Подольск, ул. Кирова, д. 15.