ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(Кузнечно-прессовое, литейное и другие производства)

№ 4 апрель 2015

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

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

Зам. Главного редактора
СЕРИКОВА Е.А.

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

Ответственный за подготовку и выпуск номера
СЕРИКОВА Е.А.

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Литейное и сварочное производства

Макаренко К.В., Тарасов А.А., Жижкина Н.А., Зенцова Е.А. Теоретическое обоснование модифицирования высокопрочного чугуна как способа измельчения графитовой фазы 3
Лебедев В.А., Сараев Ю.Н., Драган С.В., Козырко О.А. Импульсные алгоритмы функционирования в механизированном оборудовании для дуговой сварки (состояние и перспективы) 10

Кузнечно-штамповочное производство

Хван А.Д., Хван Д.В., Гехтман Д.А. Модернизированный пресс для штамповки с кручением 21
Гойдо М.Е., Бодров В.В., Багаутдинов Р.М. Технические решения для улучшения характеристик работы гидроприводов прессов 25

Прокатно-волочильное производство

Комаров О.Н., Сапченко И.Г., Жилин С.Г. Технологические особенности процессов прессования термитной смеси для экзотермического переплава 33

Материаловедение и новые материалы

Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А., Копаев В.Н. Математическая модель процесса получения металлических гранул методом вращающегося электрода с плазменным нагревом 38
Курганова Ю.А., Лопатина Ю.А. Анализ распределения армирующей фазы в алюматричных композиционных материалах 42

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

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

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

© Издательство "Машиностроение", "Заготовительные производства в машиностроении", 2015

SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

BLANKING PRODUCTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

(Forging and stamping, foundry and other productions)

№ 4 April 2015

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

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

Editorial Assistant
SERIKOVA E.A.

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

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

An advertiser is responsible for the promotional materials

Journal is spreaded on a subscription, which can be issued in any post office (index on the catalogue of the "Rospechat" agency **81580**, on the united catalogue "Pressa Rossi2 **39205**, catalogue "Pochta Rossii" **60261**) or immediately in the edition of the journal.

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

CONTENTS

Foundry and Welding Productions

Makarenko K.V., Tarasov A.A., Zhizhkina N.A., Zentsova E.A. Theoretical basis of high-duty cast iron inoculation as way of grinding of graphite phase 3
Lebedev V.A., SaraevYu.N., Dragan S.V., Kozyrko O.A. Pulsed algorithms of functioning in mechanized equipment for arc welding (state and prospects) 10

Forging and Stamping Production

Khvan A.D., Khvan D.V., Gekhtman D.A. Modernized press for torsion forming 21
Goydo M.E., Bodrov V.V., Bagautdinov R.M. Technical solutions for improve of working characteristics of hydraulic drives of presses 25

Rolling and Drawing Production

Komarov O.N., Sapchenko I.G., Zhilin S.G. Technological features of pressing of thermite mixture for exothermic remelting 33

Physical Metallurgy and New Materials

Rudskoy A.I., Kondrat'ev S.Yu., Sokolov Yu.A., Kopaev V.N. Mathematical model of producing of metal granules by method of rotating electrode with plasma heating 38
Kurganova Yu.A., Lopatina Yu.A. Analysis of reinforcing phase distribution in aluminium matrix composite materials 42

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

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

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

УДК 669.131.7:669.046.521

К.В. Макаренко, А.А. Тарасов*, Н.А. Жижкина, Е.А. Зенцова
(Брянский государственный технический университет,
**ОАО "192 Центральный завод железнодорожной техники", г. Брянск)*

Теоретическое обоснование модифицирования высокопрочного чугуна как способа измельчения графитовой фазы

Рассмотрены научные основы процесса модифицирования, основанные на анализе гомогенного и гетерогенного механизмов зародышеобразования. На основании представленной теории показаны несколько направлений, которые могут быть использованы для повышения эффективности зародышеобразования в высокопрочном чугуне. Разработана концепция "синергетического" модифицирования, базирующаяся на усилении процессов зародышеобразования графита в начальный момент кристаллизации чугуна.

Ключевые слова: чугун; модифицирование; графит; кристаллизация; синергия.

The scientific basis of the process of modification based on the analysis of homogeneous and heterogeneous nucleation mechanisms are considered. On the basis of the representation the theory several lines that may be used to increase the efficiency of nucleation in high-duty cast iron are presented. The concept-tang "synergistic" inoculation based on strengthening of the nucleation processes of graphite in the initial moment of cast iron solidification is developed.

Keywords: cast iron; inoculation; graphite; crystallization; synergy.

Актуальной остается задача повышения свойств графитизированных чугунов. В статье [1] были представлены основные направления повышения механических и эксплуатационных свойств в высокопрочных чугунах с шаровидным графитом. Одним из наиболее перспективных является снижение роли графитовых включений как концентраторов напряжений вследствие уменьшения их размеров и обеспечения более равномерного распределения в объеме металлической матрицы. Основным технологическим способом, позволяющим эффективно управлять процессами формирования графитовой фазы при кристаллизации, остается модифицирование.

В соответствии с классификацией, предложенной П.А. Ребиндером, модификаторы подразделяются на группы, но зачастую эффект, производимый модификатором на расплав, сложно однозначно систематизировать согласно установленным классификационным признакам.

Существует несколько основных методов измельчения графитовой фазы в чугунах. Первый метод — использование для уменьшения размеров и увеличения количества включений термокинетических факторов: скорости охлаждения и переохлаждения. Однако решение проблемы только путем варьирования кинетических параметров может привести к кристаллизации чугуна по метастабильной схеме или способствовать его отбелу.

Второй метод основан на применении модификаторов. Однако отсутствие единой те-

ории формирования шаровидного графита в чугуне не позволяет эффективно использовать этот метод для получения заданных структур.

Третий метод — управление размерами графитных включений осуществляется путем регулирования исходного химического состава чугуна. Элементы, которые оказывают существенное влияние на размеры и количество графитных включений в структуре, — C, Si, Mn, Al, Cu, P.

Четвертый метод — механическое воздействие на расплав в жидком или затвердевающем состоянии. Использование при производстве чугуна методов обработки расплава вибрацией, ультразвуком или продувки газами оказывает положительный эффект на измельчение графита, но сопряжено с технологическими сложностями реализации этих методов.

Очевидно, решение проблемы измельчения графита в чугуне заключается в совместном использовании всех ранее перечисленных методов.

Целью работы является разработка теоретических основ новой концепции модифицирования, направленной на измельчение графитовой фазы и основанной на усилении процесса зародышеобразования в результате суммарного воздействия на расплав ряда физических явлений и технологических методов в начальный момент образования зародышей графита в расплаве.

В теории управления, физике, биологии и медицине используется понятие синергизма. Данный термин объясняет эффект, при котором совместное воздействие на некую систему одновременно нескольких факторов превышает влияние отдельных факторов или их сумму. Эффект от модифицирования может быть усилен путем кооперации таких технологических параметров, как рациональный выбор химического состава сплава, термокинетическое и динамическое воздействия на расплав на этапе зародышеобразования.

Зародышеобразование графита в расплаве чугуна может развиваться в соответствии с механизмами гетерогенного и гомогенного образования новой фазы. Существуют две противоположные гипотезы возникновения графитовых зародышей из расплава.

В частности, в ряде работ было доказано, что в основании зародыша графита находятся *неметаллические включения* (НМВ), образующиеся на базе компонентов, вносимых при модифицировании расплава [2, 3]. Противоположной точки зрения придерживаются И.К. Кульбовский и Е.И. Марукович, которые утверждают, что зародыши графита возникают на кластерах графита, присутствующих в расплаве [4, 5]. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что зародышеобразование графита в чугуне происходит как по гетерогенному, так и по гомогенному механизмам. Поэтому общее число зародышей графита N, возникающих из расплава, есть сумма зародышей, образовавшихся по гомогенному $N_{гом}$ и гетерогенному $N_{гет}$ способам:

$$N = N_{гом} + N_{гет}. \quad (1)$$

Как известно, энергия образования гомогенного зародыша определяется как разность между поверхностной и объемной энергией:

$$\Delta G_{гом.г} = 4\pi r^2_{гом.г}\sigma_{\Gamma L} - \frac{4}{3}\pi r^3_{гом.г}\Delta G_V, \quad (2)$$

где $r_{гом.г}$ — радиус сферического зародыша (агрегатированного кластера) графита; $\sigma_{\Gamma L}$ — поверхностное натяжение на межфазной границе графит—расплав; ΔG_V — разность объемных плотностей свободной энергии между графитом и исходным расплавом в состоянии $P(\tau_0)$.

Величина ΔG_V зависит от изменения температуры и переохлаждения и на основании уравнения Гиббса и равенства свободных энергий графита G_Γ и расплава G_L в момент, когда кластеры графита, присутствующие в расплаве, начинают агрегацию, приводящую к образованию зародыша графита:

$$G_\Gamma = G_L,\ \Delta G_V = 0. \quad (3)$$

При переохлаждении, соответствующем $\Delta T_{гом}$, в момент ($\tau_{Г.гом}$) равенство (3) нарушается ($G_\Gamma < G_L$), система переходит в состояние $P(\tau_{Г.гом})$, соответствующее образованию графитового зародыша по гомогенному механизму, и разница свободных энергий может быть определена по выражению:

$$\Delta G_V = \left(\frac{\partial \Delta G_V}{\partial T}\right)_P \Delta T_{гом}, \quad (4)$$

так как

$$\left(\frac{\partial \Delta G_V}{\partial T}\right)_P = -\Delta S_V = -\frac{\Delta H_{\text{кр.г}}}{T_{\text{кр.г}}}, \qquad (5)$$

где $\Delta H_{\text{кр.г}}$ — скрытая теплота образования графита; $T_{\text{кр.г}}$ — температура кристаллизации графита, то с учетом молярного объема $V_{m\Gamma}$ графита объемная свободная энергия может быть определена по выражению:

$$\Delta G_V = -\frac{\Delta H_{\text{кр.г}} \Delta T_{\text{гом}}}{T_{\text{кр.г}} V_{m\Gamma}}. \qquad (6)$$

Подставляя выражение (6) в уравнение (2) при условии, что образование зародыша графита критического размера соответствует максимуму на кривой зависимости $\Delta G_{\text{гом.г}} - r_{\text{гом.г}}$, т.е. $d\Delta G_{\text{гом.г}}/dr_{\text{гом.г}} = 0$, можно вычислить критический радиус графитового зародыша, образующегося по гомогенной схеме:

$$r^{\text{кр}}_{\text{гом.г}} = -\frac{2\sigma_{\Gamma L}}{\Delta G_V} = \frac{2\sigma_{\Gamma L} T_{\text{кр.г}} V_{m\Gamma}}{\Delta H_{\text{кр.г}} \Delta T_{\text{гом}}}. \qquad (7)$$

Энергия образования критического зародыша графита по гомогенному механизму:

$$\Delta G^{\text{кр}}_{\text{гом.г}} = \frac{16}{3}\pi\sigma^3_{\Gamma L}\left(\frac{T_{\text{кр.г}} V_{m\Gamma}}{\Delta H_{\text{кр.г}} \Delta T_{\text{гом}}}\right)^2. \qquad (8)$$

При гетерогенном зародышеобразовании, когда кластеры графита агрегатируют на НМВ или недорастворившихся включениях графита энергию образования зародыша критического размера можно определить по формуле

$$\Delta G^{\text{кр}}_{\text{гет.г}} = \frac{16}{3}\pi\sigma^3_{\Gamma L}\left(\frac{T_{\text{кр.г}} V_{m\Gamma}}{\Delta H_{\text{кр.г}} \Delta T_{\text{гет}}}\right)^2 \times \times\left[\frac{(2+\cos\theta)(1+\cos\theta)^2}{4}\right], \qquad (9)$$

где θ — краевой угол смачивания между подложкой и растущей вследствие присоединяющихся кластеров графитовой фазы и атомарного углерода.

В [2] используют так называемый форм-фактор:

$$f(\theta) = \left[\frac{(2+\cos\theta)(1+\cos\theta)}{4}\right]. \qquad (10)$$

Таким образом, различие между энергиями образования зародышей по гомогенному и гетерогенному механизмам заключается в разнице между величинами переохлаждения ($\Delta T_{\text{гом}} > \Delta T_{\text{гет}}$) и форм-фактором $f(\theta)$.

Количество зародышей определяют по формуле Аррениуса, для гомогенного зародышеобразования:

$$N_{\text{гом}} = N_{\text{кл.г}} \exp\left[-\frac{\Delta G^{\text{кр}}_{\text{гом.г}}}{RT}\right], \qquad (11)$$

где $N_{\text{кл.г}}$ — число кластеров графита и атомарного углерода в расплаве; R — постоянная Больцмана; T — температура.

При гетерогенном зародышеобразовании:

$$N_{\text{гет}} = N_{\text{вк}} \exp\left[-\frac{\Delta G^{\text{кр}}_{\text{гет.г}}}{RT}\right], \qquad (12)$$

где $N_{\text{вк}}$ — число включений, которые могут играть роль подложки при гетерогенной кристаллизации графита.

Общее число зародышей в соответствии с формулами (1), (8)—(12):

$$N = (N_{\text{кл.г}} + N_{\text{вк}}) \times \times \exp\left[-\frac{\Delta G^{\text{кр}}}{RT}\left(\frac{1}{\Delta T^2_{\text{гом}}} + \frac{f(\theta)}{\Delta T^2_{\text{гет}}}\right)\right], \qquad (13)$$

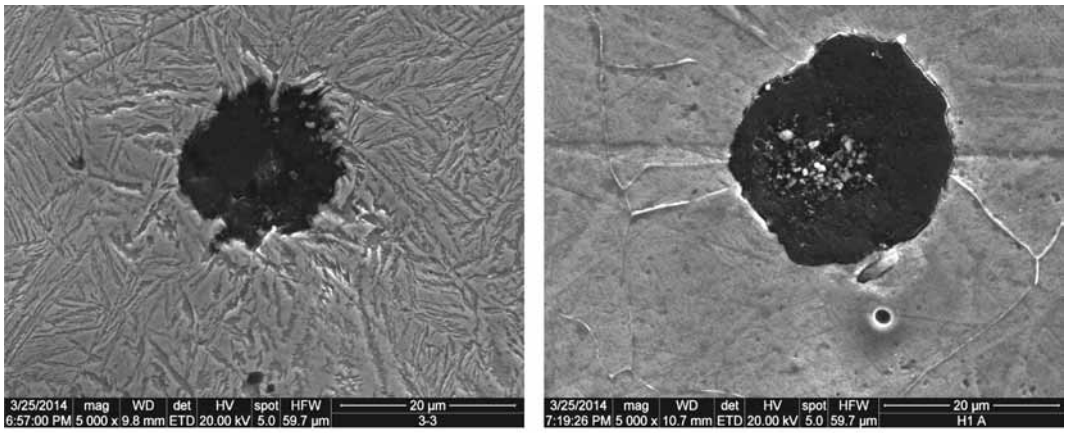
где

$$\Delta G^{\text{кр}} = \frac{16}{3}\pi\sigma^3_{\Gamma L}\left(\frac{T_{\text{кр.г}} V_{m\Gamma}}{\Delta H_{\text{кр.г}}}\right). \qquad (14)$$

Так как $\Delta G^{\text{кр}}_{\text{гет.г}} < \Delta G^{\text{кр}}_{\text{гом.г}}$, то первоначально зародыши графита образуются на НМВ. Кластеры графита и атомарный углерод агрегатируют на включениях, которые изначально присутствовали в расплаве или образовались после модифицирования из компонентов расплава или модификатора. На рис. 1 представлены фотографии графитовых сфероидов, полученные при исследовании микроструктуры с помощью РЭМ, содержащие в центральной части НМВ.

Морфология центральных зон графитовых включений различна, она может быть представлена относительно крупными монолитными включениями (см. рис. 1, *а*) или мелкими агрегатированными НМВ (см. рис. 1, *б*).

Процесс гетерогенного зародышеобразования начинается при переохлаждении $\Delta T_{\text{гет}}$.



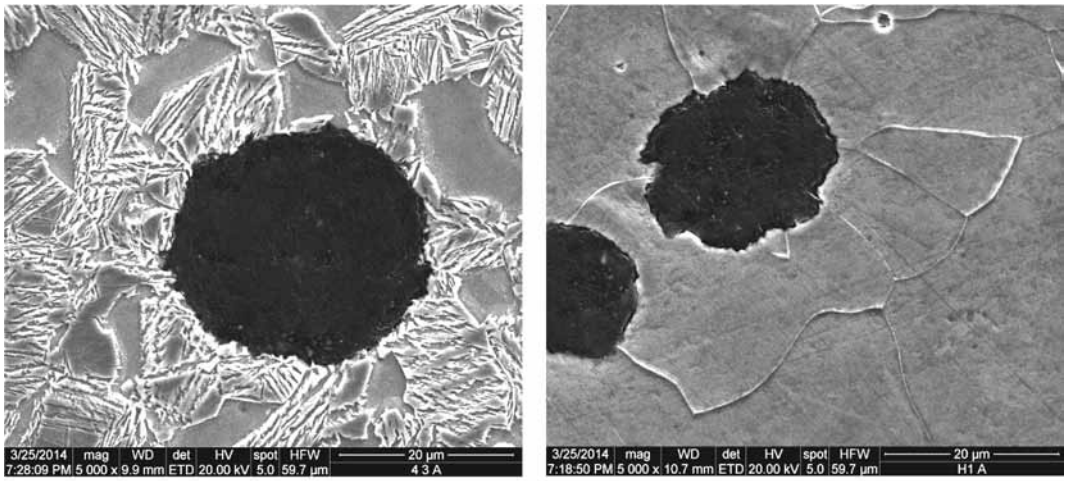
а) *б)*

Рис. 1. Графитовые сфероиды, содержащие в центральной части НМВ:
а — относительное крупное монолитное неметаллическое включение; *б* — сложный агрегат, состоящий из мелких дисперсных включений

Последующее укрупнение зародышей графита приводит к увеличению поверхности раздела Г—L, что требует затрат энергии пропорционально $4\pi\sigma_{\Gamma L}$. Этот процесс способствует росту величины переохлаждения, что инициирует процесс гомогенного зародышеобразования графита. На рис. 2 показаны фотографии сфероидов графита, в центральной части которых не были обнаружены НМВ.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что процесс образования графитовой фазы, в частности при использовании инокулирующего модифицирования, протекает в два этапа. На первом этапе, за счет образования НМВ образуются зародыши графита по гетерогенному механизму. На втором этапе, который инициируется путем создания необходимого $\Delta T_{гом}$, начинается гомогенное зародышеобразование графита.

Воздействие химического состава расплава на процесс зародышеобразования рассмотрим с позиции оценки влияния основных компонентов чугуна (C и Si). Если кристаллизация происходит в сплавах с эвтектикой, то выбор химического состава, близкого к эвтектическому, способствует получению мелкодисперсной механической смеси фаз.



а) *б)*

Рис. 2. Графитовые сфероиды в высокопрочном чугуне, не содержащие НМВ в центральной части:
а — отдельное включение; *б* — элемент цепочки включений

При модифицировании чугунов рационально применять многостадийные способы печной и внепечной обработки расплава. При растворении комплексной лигатуры, содержащей ферросилиций и графит, в расплаве чугуна возникают области с повышенной концентрацией углерода и кремния. Гетерогенизация расплава приводит к появлению зон с преобладающей концентрацией Si и C, соответствующей заэвтектическому составу. В таких областях возникают флуктуирующие кластеры графитовых зародышей. При последующем сфероидизирующем модифицировании эти кластеры стабилизируются и агрегатируют в устойчивые зародыши графита.

Гетерогенизация расплава по Si и C усугубляется взаимным повышением термодинамической активности углерода под влиянием кремния и наоборот. Процесс усиливается при модифицировании высококремнистыми ферросплавами, которые используются при сфероидизирующей или инокулирующей обработке. В этом случае растворение ферросилиция приводит к локальному повышению концентрации кремния в отдельных микрообъемах расплава.

В работе [6] показано, что высококремнистые расплавы, к которым в частности относятся высокопрочные чугуны, склонны к расслоению, в результате которого расплав представляет собой две несмешивающиеся жидкости: L_1 — кремнистый расплав и L — углеродистый расплав (рис. 3). Повышение концентрации кремния сдвигает эвтектическую точку на диаграмме влево, что приблизительно может быть определено через углеродный эквивалент или степень насыщенности.

При этом расплав, содержащий повышенную концентрацию кремния и та часть расплава, в котором сохраняется первичный расплав, выпущенный из печи в ковш для модифицирования, будет кристаллизоваться по

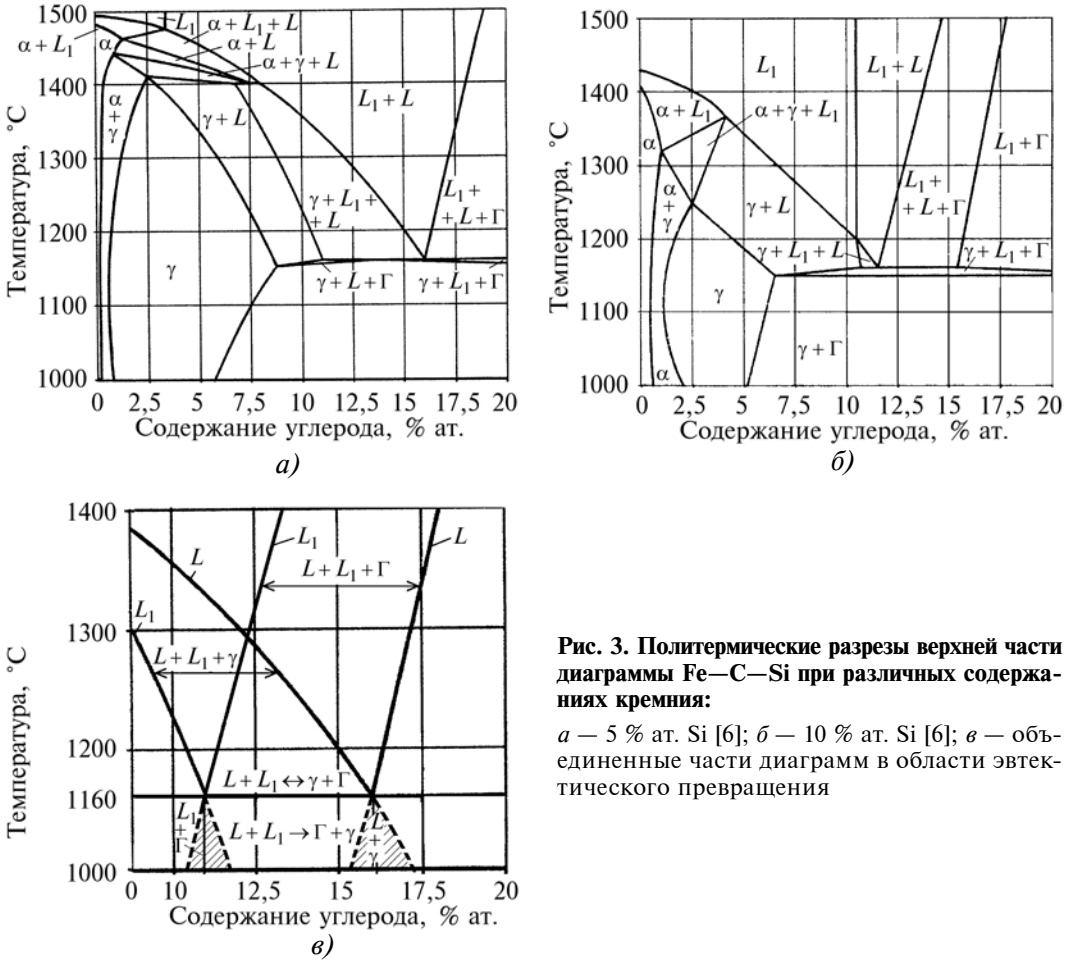


Рис. 3. Политермические разрезы верхней части диаграммы Fe—C—Si при различных содержаниях кремния:

а — 5 % ат. Si [6]; *б* — 10 % ат. Si [6]; *в* — объединенные части диаграмм в области эвтектического превращения

различным механизмам (см. рис. 3, *в*). В высококремнистом расплаве будут выделяться первичные кластеры графита, в высокоуглеродистом — аустенита.

Аналогичные выводы представлены в работе А.А. Жукова, Р.Л. Снежного (О малой скорости массопереноса и структурных изменений в жидком модифицированном чугуне // Литейное производство. 1976. № 11. С. 4—5), в которой на основании термодинамического анализа сделан вывод о возникновении в системе зоны индифферентности, характеризующейся малыми скоростями массопереноса, которые сохраняют в расплаве химическую неоднородность более длительное время, что позволяет сохранить эффект модифицирования. Тепловые флуктуации и конвекция приводят к постепенному угасанию эффекта модифицирования, что объясняется снижением степени микрогетерогенности расплава.

Анализируя сфероидизирующее модифицирование, необходимо выделить положительные явления, способствующие дополнительному измельчению графитовых включений в чугуне. Во-первых, после сфероидизирующего модифицирования возникает значительное переохлаждение расплава, которое может достигать 30 °С [5]. Этот эффект может быть усилен путем понижения температуры выпуска расплава из печи при сфероидизирующем модифицировании чугуна.

На основании исследований оптимальная температура для модифицирования в 500...1000-килограммовом ковше составляет 1400...1450 °С. Однако при этом необходимо исходить из особенностей конфигурации и массы получаемых изделий и необходимой жидкотекучести расплава. Переохлаждение приводит к уменьшению критического радиуса зародыша графита $\left(r^{\text{кр}}_{\text{гом.г}}, r^{\text{кр}}_{\text{гет.г}}\right)$.

Во-вторых, использование при сфероидизирующем модифицировании магнийсодержащих лигатур приводит к интенсивному газообразованию. Пузырьки газа, проходя через объем жидкого металла, производят механическое воздействие на расплав, приводящее к разрушению первоначально образовавшихся кластерных агрегатов и возникновению на базе их обломков новых потенциальных зародышей графита.

По данным [7], аналогичные явления, возникающие при продувке металла газами, способствуют возникновению условий самоорганизации структурообразования в расплавах. С этих позиций можно объяснить образование фрактальных агрегатов, представленных цепочками графитовых включений в высокопрочном чугуне [8, 9].

Силой, способствующей самоорганизации эвтектических ячеек в чугуне, является турбулизация среды, проявляющаяся при барботировании расплава газами, образующимися при сфероидизирующем модифицировании магнием и магнийсодержащими ферросплавами. Для устранения данного эффекта расплав в ковше непосредственно перед заливкой необходимо дополнительно перемешивать, что должно способствовать образованию более равномерного распределения зародышей графита при затвердевании чугуна.

Особое внимание необходимо уделять выбору компонентов модификаторов. В процессе растворения модификатора на базе его элементов в расплаве образуются тугоплавкие НМВ, которые должны отвечать принципу структурно-размерного соответствия П.Д. Данкова. Поэтому выбор компонентов модификатора, способствующих возникновению в расплаве химических соединений, сопряженных с решеткой графита, обеспечивает дополнительное усиление процесса инокулирования.

Таким образом, технология "синергетического" модифицирования использует многостадийную обработку расплава:

1) предсфероидизирующая обработка чугуна ферросилицием в индукционной печи непосредственно перед выпуском металла в ковш для гетерогенизации расплава;

2) позднее графитизирующее инокулирование, обеспечивающее гетерогенное зародышеобразование графита;

3) ввод кремнийсодержащих ферросплавов должен обеспечивать эвтектический состав чугуна;

4) расчет температуры модифицирования с учетом необходимой жидкотекучести чугуна;

5) механическое перемешивание расплава после сфероидизирующего модифицирования.

Рассмотренные явления и закономерности усиливают склонность чугуна к зародышеобразованию и при их единовременном воздействии на расплав в период зарождения в нем графита оказывают синергетическое действие на процесс графитизации.

Дополнительное измельчение графитовых включений может быть обеспечено при термической обработке изначально полученной из литого состояния ферритной структуры в результате повышения концентрации кремния в чугуне. Используя высокие температуры нагрева на аустенитизацию, можно за счет растворения графитовой фазы при насыщении аустенита углеродом уменьшить размеры графитовых включений.

Заключение. В процессе "синергетического" модифицирования применяют различные методы, позволяющие измельчить графитовую фазу в чугуне. Резкое переохлаждение, возникающее после сфероидизирующего модифицирования, в сочетании с процессом печного инокулирования приводит к стабилизации графитовых включений. Использование низкоуглеродистых эвтектических расплавов способствует уменьшению размеров графитовой фазы при одновременном увеличении количества потенциальных графитовых зародышей. Механическое воздействие, аналогичное продувке чугуна газами, возникает при прохождении паров магния через расплав.

Совместное согласованное воздействие всех этих методов и явлений в момент формирования графита в расплаве, приводит к синергетическому эффекту, выраженному в усилении процесса измельчения графитовых включений в чугуне. На данный способ был получен патент 2402617 РФ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Повышение** прочностных свойств графитизированных чугунов / К.В. Макаренко, Е.А. Зенцова, Р.А. Богданов, Р.А. Филипов // Заготовительные производства в машиностроении. 2013. № 9. С. 3—6.
2. **Скаланд Т.** Механизмы зародышеобразования в высокопрочном чугуне // Высокие технологии в литейном производстве. 2006. Вып. 4. С. 5—24.
3. **Шаровидный** графит — строение, состав / А.А. Аникин, С.Б. Вениг, Д.И. Биленко, А.Н. Грибов, А.Г. Жуков // Металловедение и термическая обработка металлов. 2014. № 3. С. 3—6.
4. **Кульбовский И.К.** О природе центров кристаллизации графита в расплаве чугуна // Материаловедение и производство: сб. науч. тр. Вып. 2 / под ред. Г.И. Сильмана. Брянск: Изд-во БГИТА, 2001. С. 17—27.
5. **Марукович Е.И., Стеценко В.Ю.** Механизм формообразования графита при кристаллизации чугуна // Литейное производство. 2000. № 11. С. 18—19.
6. **Сильман Г.И.** Термодинамика и термокинетика структурообразования в чугунах и сталях. М.: Машиностроение, 2007. 302 с.
7. **Скуднов В.А.** Синергетика явлений и процессов в металловедении, упрочняющих технологиях и разрушении. Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2011. 198 с.
8. **Макаренко К.В., Тотай А.В., Тихомиров В.П.** Использование фрактального формализма для описания структур конструкционных сталей // Вестник Брянского гос. техн. ун-та. 2011. № 4. С. 55—64.
9. **Макаренко К.В.** Фрактальный анализ структурообразования чугуна. Брянск: БГТУ, 2013. 91 с.

Константин Васильевич Макаренко, канд. техн. наук, makkon1@yandex.ru;
Алексей Афанасьевич Тарасов, канд. техн. наук;
Наталья Александровна Жижкина;
Екатерина Александровна Зенцова

УДК 621.791

В.А. Лебедев *(Институт электросварки им. Е.О. Патона, г. Киев)*,
Ю.Н. Сараев *(Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН, г. Томск)*,
С.В. Драган *(Национальный университет кораблестроения, г. Николаев)*,
О.А. Козырко *(ООО "ДМТ Продакшин", г. Николаев)*

Импульсные алгоритмы функционирования в механизированном оборудовании для дуговой сварки (состояние и перспективы)

Рассмотрены и проанализированы основные типы импульсных воздействий, которые разработаны, используются или могут быть применены в оборудовании для дуговых механизированных и автоматических процессов для улучшения качества сварного соединения или наплавленного валика. Представлен ряд действующих в промышленности разработок. Уделено внимание перспективным разработкам и их использованию при совершенствовании процессов сварки и наплавки. Показано, что широкое распространение могут получить импульсные воздействия на ванну жидкого металла, производимые механическим путем. Сделан вывод о том, что комбинированные импульсные воздействия в различных системах механизированного и автоматического оборудования эффективны и требуют в настоящее время теоретических и экспериментальных исследований, в частности по кристаллизации металла шва.

Ключевые слова: дуговая сварка; наплавка; механизированное оборудование; электродная проволока; перенос; защитная среда; источник; изделие.

The main types of impulse functions which are developed are use or can be applicable in the equipment for arc mechanized and automated processes to improve of quality of welded joint or weld bead are considered and analyzed. Number of existing industry developments is presented. The attention to perspective developments and their use for improvement of welding processes and surfacing welding is given. It is shown that the pulse functions on molten pool produced by mechanical means can receive widespread. The conclusion that the combined pulse functions in different systems of mechanized and automated equipment are effective and require at present both theoretical and experimental studies, in particular by crystallization of the weld metal.

Keywords: arc welding; surfacing; mechanical equipment; welding wire transfer; protective environment; source; product.

Сварка и наплавка с использованием плавящегося электрода (механизированные процессы) в настоящее время являются одними из ведущих технологий в машиностроении, строительстве, ремонте, восстановлении и других отраслях хозяйственной деятельности.

Механизированное оборудование для сварки и наплавки совершенствуется по следующим основным направлениям:

— улучшение качества сварного соединения и наплавленного слоя, а следовательно, и работоспособности сварной конструкции или восстановленного (упрочненного) узла;

— снижение затрат на процесс, включающее в себя использование электродных материалов, прямые энергозатраты, затраты на придание обрабатываемому изделию необходимого товарного вида;

— увеличение производительности дугового процесса и, соответственно, труда сварщиков-наплавщиков при работе в разных пространственных положениях и при различных условиях;

— выполнение условий минимизации стоимости оборудования, обеспечение технической и технологической надежности, а также простоты эксплуатации и ремонта.

Способы и методы решения этих задач подробно описаны в работах [1, 2] и ряде других. Эти методы во многих аспектах достаточно хорошо изучены и применяются на практике.

В мировой практике создания и совершенствования нового сварочно-наплавочного оборудования для механизированных процессов сварки и наплавки плавящимся электродом основные технико-технологические решения

связаны с разработкой новых электродных материалов, защитных сред, специальных паст, а также составляющих сварочного оборудования — источников питания дуги, механизмов подачи электродной проволоки, устройств управления подачей защитной среды, систем перемещения свариваемого или наплавляемого изделия.

Современные возможности техники предопределяют развитие и внедрение импульсных технологий в сварочное производство, а также методы восстановления и упрочнения деталей наплавкой.

Импульсные алгоритмы работы систем механизированного и автоматического сварочного оборудования, а в последнее время и импульсного управления движениями свариваемой или наплавляемой конструкции выделяют в особую группу, так как кроме нового типа узлов оборудования с использованием современных достижений мехатроники не требуют ничего нового по электродным материалам, защитным середам и др. Целенаправленное применение импульсных алгоритмов работы систем механизированного и автоматического сварочного оборудования является одним из наиболее эффективных способов существенного улучшения результатов процессов сварки и наплавки.

Рассмотрение существующих данных по применению сварочного оборудования с импульсными алгоритмами работы с их комплексным анализом, а также определение путей их дальнейшего развития — *цель работы*.

В технической литературе рассмотрены и систематизированы отдельные направления в области использования импульсных технологий в механизированном и автоматическом сварочном оборудовании.

Различные алгоритмы функционирования источников сварочного тока представлены, например, в работах [3, 4]. Способы применения импульсных алгоритмов работы механизмов подачи электродной проволоки изложены в работах [5—7]. Обобщающие данные по методам импульсной подачи защитного газа приведены в работах [8, 9]. Известны данные о влиянии внешних электромагнитных полей, в том числе импульсных, на процесс сварки, однако систематизации разработок и их применении в этом направлении в существующих технических источниках практически нет. Системных данных по импульсному управлению перемещением свариваемого или наплавляемого изделия авторами статьи не обнаружено, хотя работы в этом направлении ведутся постоянно [10].

Обобщающих работ по одновременному использованию различных видов импульсных воздействий в технической литературе также нет, хотя отдельные работы по этому перспективному, но мало исследованному направлению известны [11, 12].

Вибродуговая наплавка в данной работе не рассмотрена.

Укрупненная систематизация импульсных воздействий предложенных, использованных, предлагаемых для применения и таких, которые, как показывает рациональный анализ, могут найти в перспективе применение в различных типах сварочного оборудования, представлена на рис. 1.

Рассмотрим отдельные виды воздействий с анализом их возможностей и применения в сварочном и наплавочном оборудовании различного назначения.

Первым способом импульсного воздействия, нашедшим в настоящее время широкое распространение, следует считать импульсно-дуговой процесс, реализуемый на основе источника питания сварочной дуги. Отметим, что этот способ не должен претендовать на первенство, так как известны работы по вибродуговой наплавке, механическим импульсным воздействиям со стороны механизма подачи. Однако несовершенство этих систем в прошлом не дало возможности выявить их технико-технологические преимущества для использования в промышленном сварочно-наплавочном механизированном оборудовании.

Импульсно-дуговой процесс развивался по двум основным направлениям:

— работа источника сварочного тока по жесткой программе формирования импульсов, пауз, вспомогательных уровней [13];

— реализация разнообразных по характеристикам и возможностям синергетических алгоритмов управления [14].

Основная задача, решаемая импульсно-дуговым процессом, — управление переносом электродного металла. При этом, если в случае жестко программированного процесса этот перенос обусловливается практически не изменяемым по параметрам импульсом без

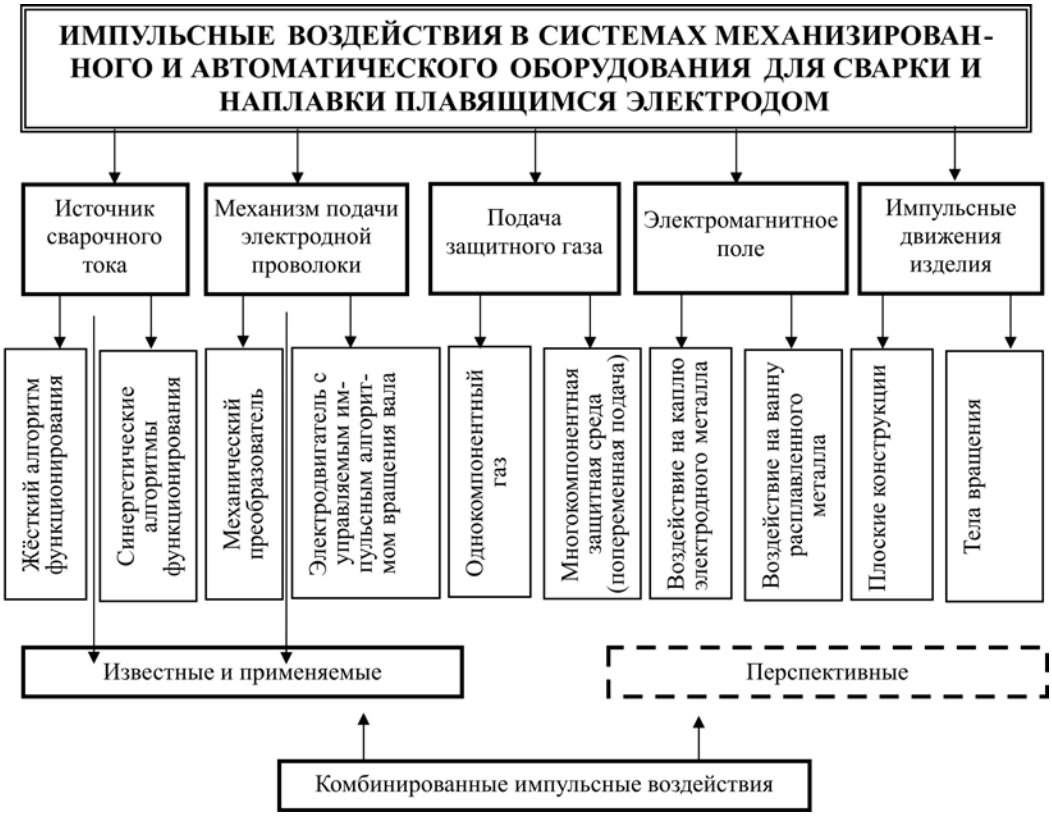


Рис. 1. Импульсные воздействия в системах сварочного и наплавочного оборудования

использования обратных связей по характеристикам дугового процесса, то для синергетических процессов используются комплексы обратных связей и выбор наиболее оптимального, по мнению различных разработчиков, режима переноса электродного металла. Например, в работах [15—17] рассмотрены различные способы синергетического управления с разработкой алгоритмов управления энергетическими параметрами режима, а обобщение сделано в работе [18].

Необходимо уточнить, что реализация импульсно-дугового процесса возможна на практически любом типе источника с регулируемыми выходными параметрами. Синергетические алгоритмы с современным подходом можно реализовать только с использованием совершенных источников питания дуги инверторного типа с компьютеризованным управлением.

Наиболее эффективное применение импульсно-дуговых процессов — сварка цветных металлов, коррозионно-стойких сталей в среде защитных газов и др. В меньшей степени эти процессы используются при сварке сталей в углекислом газе, этот способ механизированной сварки является распространенным, что обусловлено его простой реализацией. Это можно отнести к сварке и наплавке с применением ряда самозащитных электродных проволок.

Способы импульсного управления дуговыми механизированными процессами постоянно совершенствуются и развиваются по нескольким направлениям.

Следует отметить один из новых способов в реализации импульсно-дугового процесса — адаптивное управление [19]. Этот способ в настоящее время применяют при ручной дуговой сварке покрытыми электродами с получением значимых результатов. Дальнейшее развитие этого способа приведет к новому направлению в импульсно-дуговых технологиях с более широким применением в механизированном и автоматическом оборудовании для сварки и наплавки. Адаптивное управление сварочных процессов, реализуемое с помощью источника сварочного тока, оснащенного специальными датчиками и особым алгоритмом управления, априори приспособлены к эффективному ре-

шению задач по сварке и наплавке в жестких климатических условиях, например низкие температуры (ниже 45 °С).

Адаптивное управление с использованием инверторных источников сварочного тока состоит в управлении и контроле посредством обратных связей всех элементов формирования сварного соединения: стадий переноса электродного металла, кристаллизации расплавленного металла при действии характерных возмущающих воздействий.

Примером реализации способа адаптивного управления дуговой сварки, может быть устройство, блок-схема которого представлена на рис. 2.

Система адаптивного управления процессом дуговой сварки включает в себя: источник питания (ИП) с блоком управления энергетическими параметрами режима сварки (БУЭХ), объект управления (ОУ), включающий в себя дугу (Д), ванну (СВ) и изделие (И), а также блок контроля температурного режима изделия (БКТИ), состоящий из датчиков температуры (ДТ), блока сравнения текущего значения температуры с задаваемой (БС) и блока задания рекомендуемых значений температуры изделия ($T_з$).

Разработка адаптивных импульсных технологических процессов сварки позволяет осуществлять программируемый ввод теплоты в зону сварного соединения, управлять процессами плавления и капельного переноса электродного металла, формированием структуры шва и зоны термического влияния, уменьшать степень остаточных деформаций сварных соединений при обеспечении стабильности импульсного режима при сварке в различных пространственных положениях. В отличие от известных процессов дуговой сварки, в том числе импульсных с использованием жестких программ управления, адаптивные импульсные процессы позволяют корректировать режимы по мгновенным значениям основных энергетических параметров сварочного процесса в зависимости от состояния объекта управления "источник питания—дуга—сварочная ванна".

Приведенный выше подход к совершенствованию технологических процессов сварки и наплавки позволил создать инновационные технические и технологические решения, обеспечивающие стабильность характеристик тепломассопереноса при осуществлении различных способов дуговой сварки.

Импульсно-дуговые способы реализуются многочисленными разработками современных инверторных источников сварочного тока, преимущественно с компьютеризованным управлением и синергетическими алгоритмами управления переносом электродного металла. Некоторые характерные возможности разработок таких источников представлены в работе [20].

Одной из самых интересных разработок, выполненных для реализации синергетического управления, является новое поколение инверторных источников сварочного тока с цифровым синтезом управления сварочным источником. Эта разработка описана в работе [21].

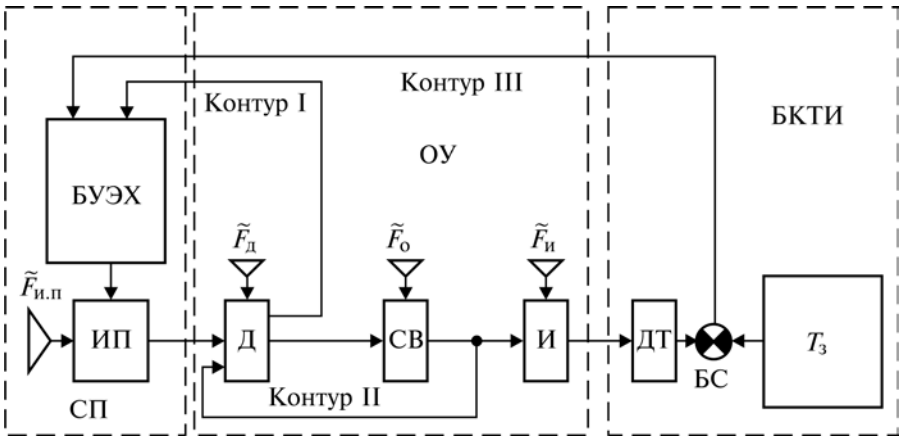


Рис. 2. Блок-схема адаптивной системы автоматического регулирования технологическим процессом (АСАРТП):

$F_{и.п}$, $F_д$, $F_о$, $F_и$ — возмущающие воздействия на источник питания, дугу, сварочную ванну и изделие соответственно

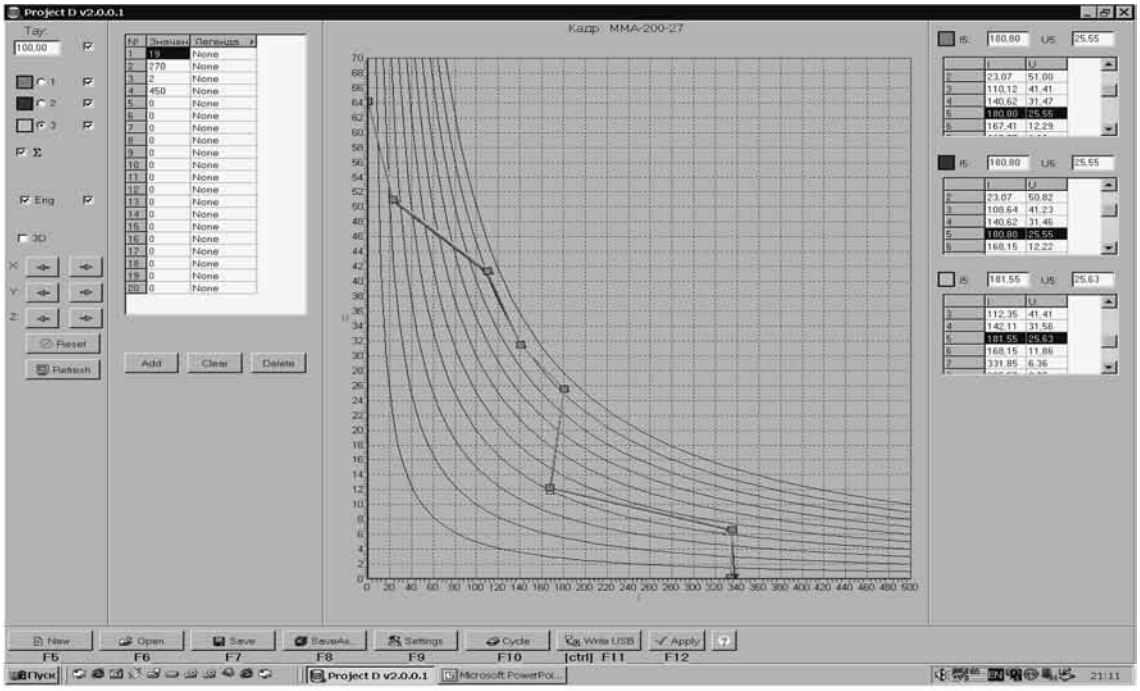
В источнике цифровым способом достаточно просто регулируются динамические и выходные вольтамперные характеристики (ВАХ), что позволяет реализовать любой из известных алгоритмов управления переносом электродного металла, что, как следует из анализа оборудования известных фирм-производителей сварочного оборудования, является приоритетной задачей, обеспечивающей качественное и эффективное ведение сварочных процессов. Заметим, что при апробировании системы цифрового синтеза

сварочного процесса возникло несколько новых алгоритмов управления, в числе которых управление с online регулированием фронтов нарастания и спада импульсов.

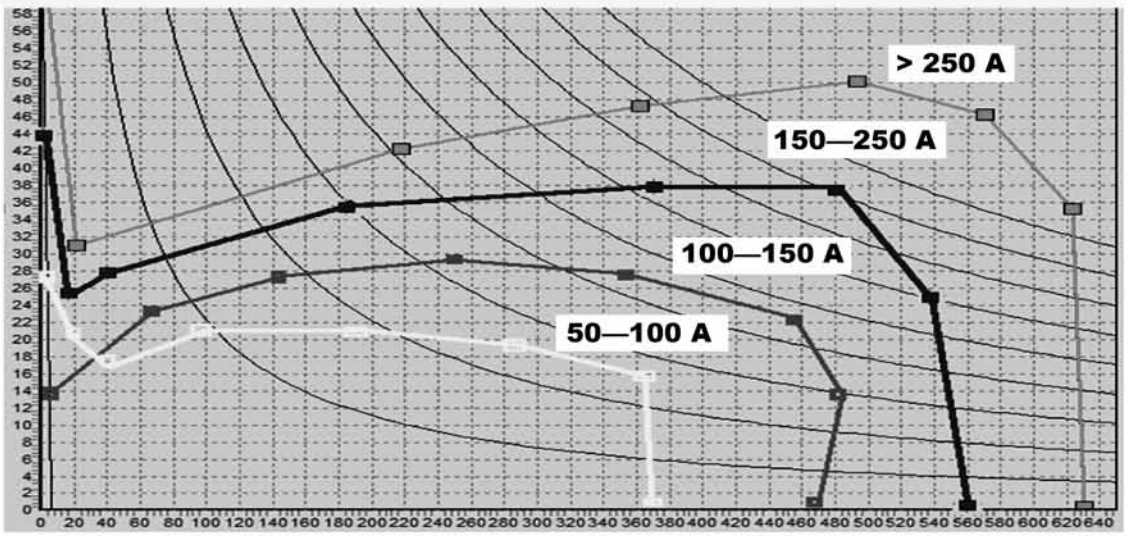
На рис. 3 показаны возможности нового источника по "конструированию" важнейшего параметра источника — ВАХ, а на рис. 4 — сравнительные результаты наплавки.

Интересным направлением, получившим в последнее время новое развитие, является импульсная подача электродной проволоки, реализуемая для решения задачи управления переносом электродного металла. Ранее распространение этой технологии сдерживалось отсутствием системных знаний о явлениях, сопутствующих как работе системы подачи электродной проволоки, так и воздействию генерируемых импульсов непосредственно на процесс капельного переноса.

Разработки прежних лет базировались на достаточно простых, практически неуправляемых конструкциях различных механических



а)



б)

Рис. 3. Виды редактора для ввода ВАХ в источник (*а*) и ВАХ для различных режимов полуавтоматической сварки (*б*)

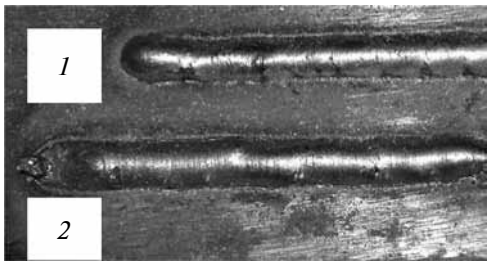


Рис. 4. Результат наплавки валиков:

1 — при применении цифрового управления; *2* — без цифрового управления

и электромагнитных преобразователей движения в импульсы подачи проволоки [22]. Основным движителем таких преобразователей были односторонние захваты с низкой надежностью и долговечностью.

В последнее время время шаговые электродвигатели с компьтеризованными регуляторами дали возможность создавать механизмы подачи с достаточно широкими возможностями по формированию импульсов движения электродной проволоки [23]. Однако наиболее совершенным механизмом импульсной подачи в настоящее время является механизм на основе вентильного компьютеризованного электропривода специальной разработки [24]. Движителями электродной проволоки в таком полуавтомате являются пары роликов. Такой механизм может реализовать сложный алгоритм импульсного движения электродной проволоки, который выработан на основании комплекса экспериментальных исследований (рис. 5).

На рис. 6 представлена осциллограмма реальной скорости подачи электродной проволоки в режиме импульс—пауза. Частота следования импульсов $f = 1/T_и = 40$ Гц. Осциллограммы получены при оценке возможностей полуавтомата с регулируемой импульсной подачей электродной проволоки для сварки в CO_2 короткой дугой. Новая конструкция такого полуавтомата представлена на рис. 7.

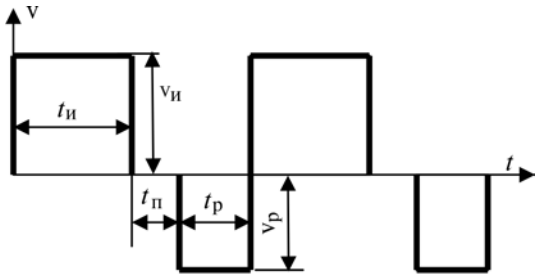


Рис. 5. Идеализированный графический алгоритм импульсной подачи электродной проволоки

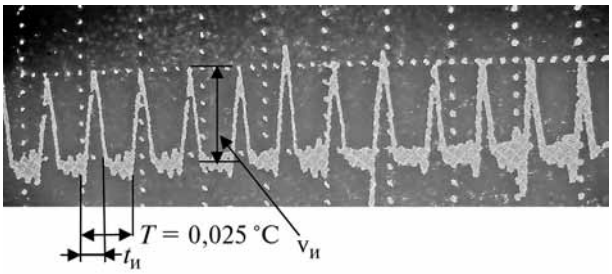


Рис. 6. Осциллограмма скорости импульсной подачи:

T, $t_и$ — время цикла импульсной подачи и действия импульса соответственно; $v_и$— скорость в импульсе

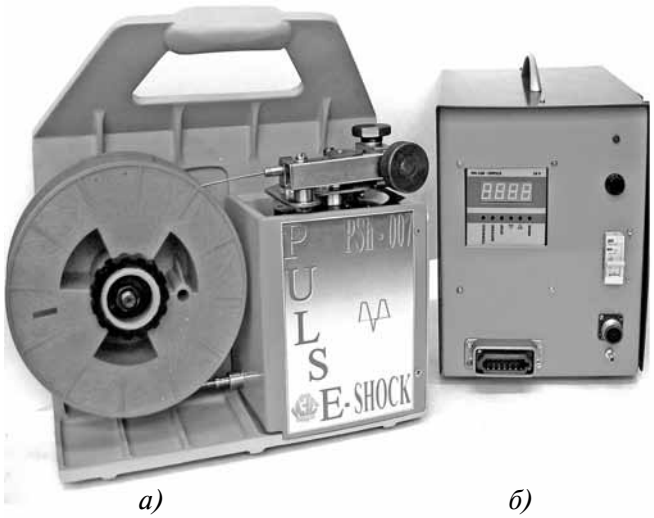


Рис. 7. Полуавтомат с импульсной подачей электродной проволоки:

а — блок подачи с вентильным электродвигателем; *б* — система питания и управления с компьютеризованным регулятором параметров импульсной подачи

Дальнейшее развитие этого направления связано с совершенствованием оборудования и разработкой методик оптимального выбора параметров импульсной подачи как для сварки в защитных газах, так и наплавки самозащитными порошковыми электродными проволоками.

Отметим основные возможности процесса сварки с управляемой импульсной подачей электродной проволоки:

— возможность управления формой шва, проплавления и зоной термического влияния;

— улучшение качества сварного шва и наплавленного валика металла;

— снижение потерь электродного металла на угар и разбрызгивание, прямых и косвенных затрат электроэнергии.

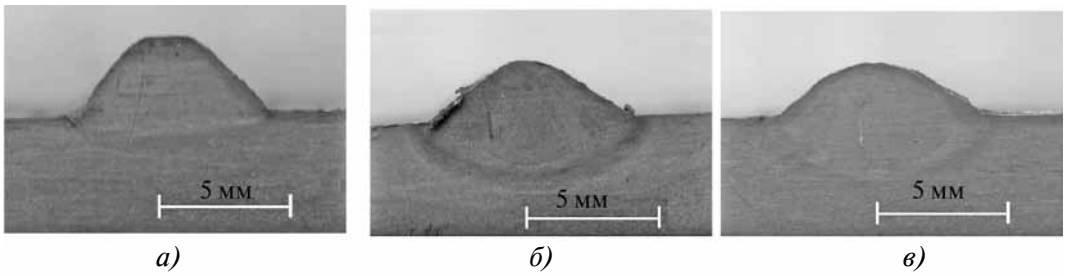


Рис. 8. Наплавленные валики металла при импульсной подаче:
а — f = 10 Гц; s = 5; *б* — f = 35 Гц; s = 3; *в* — f = 60 Гц; s = 2

Возможность управления геометрическими размерами наплавленного валика при одних и тех же интегральных параметрах дугового процесса, но изменяемых характеристиках импульсной подачи (f, s — частота и скважность соответственно) можно видеть на макрошлифах валиков наплавленного металла на рис. 8.

Следует отметить, что разработка оборудования на основе синергетических алгоритмов управления относится и к системам подачи электродной проволоки. В настоящее время выполнены разработки для построения систем импульсной подачи электродной проволоки с синергетическим управлением сварочным процессом [25]. Одним из важных технических средств реализации этой задачи является создание систем импульсной подачи электродной проволоки с обратными связями по параметрам дугового процесса.

Синергетический процесс сварки короткой дугой характеризуется высокой стабильностью, расширением диапазона режимов в сторону их уменьшения и малым разбрызгиванием, при этом достигается эффект дальнейшего управления формированием сварного соединения и зоной термического влияния. Рациональная область применения синергетического процесса сварки короткой дугой — это соединение малых толщин металла от 0,5 мм, наплавка слоев толщиной 0,5...1,0 мм плоских поверхностей и тел вращения, повышение размерной точности сборочных единиц благодаря малым деформациям.

Рассмотрим еще один способ применения механического импульсного воздействия в системе подачи электродной проволоки.

В работе [26] описаны способ и технологические характеристики автоматической наплавки под флюсом с поперечными высокочастотными колебаниями электрода. Положительный эффект от этого способа импульсного воздействия позволяет утверждать, что он имеет перспективу, в частности, при автоматической сварке и наплавке. Определено, что приложение к электродной проволоке поперечных высокочастотных импульсных перемещений, создаваемых с помощью специально разработанного электромеханического генератора, позволяет повысить производительность плавления электрода и обеспечить управление геометрическими параметрами валика при автоматической наплавке под флюсом. Сделан вывод о существенном снижении доли участия основного металла в наплавленном металле.

Производительность процесса наплавки под флюсом с применением выбранных по параметрам поперечных колебаний повышается (см. таблицу).

Оценка производительности наплавки с разными режимами колебаний электрода

Частота колебаний, Гц	Коэффициент наплавки, г/(А·ч)
0	$\frac{15,0...15,2}{15,0}$
250	$\frac{17,9...18,2}{18,2}$
305	$\frac{19,6...20,0}{19,7}$
320	$\frac{22,4...22,8}{22,6}$

Дальнейшее развитие способа наплавки с поперечными колебаниями электродной проволоки связаны с совершенствованиями механизма колебаний с получением полностью управляемых параметров, а также с поисками возможности применения разработки в про-

цессах, реализуемых при сварке—наплавке в защитных газах, а также порошковыми самозащитными электродными проволоками.

Рассмотрим еще один перспективный способ наплавки с использованием импульсных механических колебаний, который основан на воздействии управляемых по параметрам импульсов на наплавляемое изделие.

Начиная с 1980-х гг. были проведены широкие исследования колебаний сварочной ванны и применение колебаний для управления глубиной проплавления. Для получения таких колебаний использовались импульсы сварочного тока, электромагнитное воздействие, импульсное действие защитного газа. Кроме этих способов в качестве генератора колебаний сварочной ванны возможен также способ, который придает колебание сварочной ванне через возвратно-поступательное движение всего изделия. С помощью этого способа, ко всем указанным выше возможностям других способов, можно добавить управление в более широком диапазоне геометрическими параметрами, влияние на структуру сварного шва и уменьшение зоны термического влияния.

Рассмотрено влияние вибрационных и ультразвуковых колебаний, накладываемых на свариваемые детали в процессе сварочного цикла, на механические свойства и стойкость к межкристаллитной коррозии сварных соединений из стали.

В работе [27] представлен вибростенд, имеющий возможность совершать возвратно-поступательные движения с частотой до 400 Гц и амплитудой до 40 мкм. С помощью такого вибростенда изучено влияние продольных колебаний на механические свойства сварных швов из стали. Таким образом, очевидно положительное влияние на результаты сварки—наплавки колебаний сварочной ванны.

В работе [28] описаны способ и устройство, согласно которым наплавляемому плоскому изделию придаются другие виды управляемых импульсных низкочастотных колебаний. Это стало возможным только в настоящее время на основе компьютеризированных, быстродействующих приводов с вентильными электродвигателями. Разработанное оборудование по этому способу наплавки позволяет осуществлять следующие способы колебаний изделия, а следовательно, сварочной ванны:

1) в плоскости по направлению сварки;

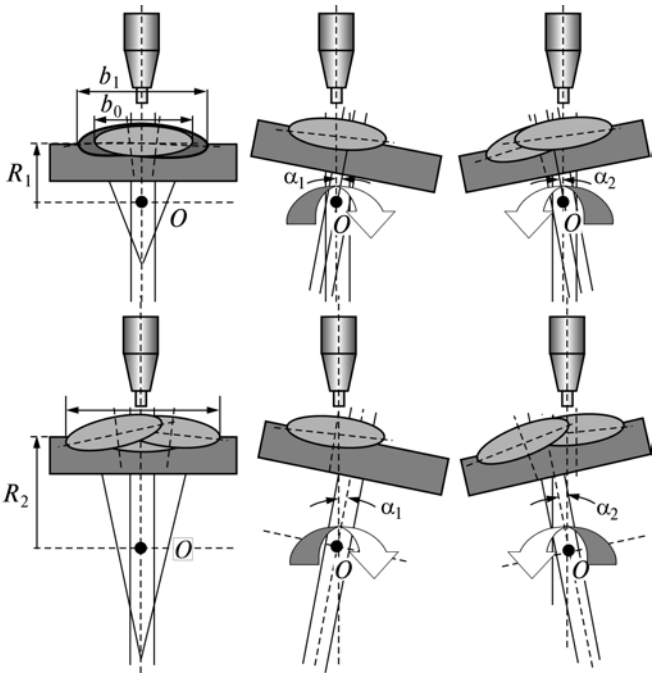


Рис. 9. Радиальные колебания в плоскости, перпендикулярной направлению сварки

2) радиальные, в плоскости, перпендикулярной направлению сварки;

3) вдоль плоскости направления сварки;

4) комбинированные.

Все эти способы колебаний с управляемыми параметрами осуществляются с помощью двух вентильных электродвигателей без редуктора, что дополнительно обеспечивает высокие динамические качества.

При генерировании колебаний в плоскости, перпендикулярной направлению сварки (рис. 9), вылет электрода остается неизменный. Колебания изделия в этом случае вызывают появление инерционной и центробежной силы, в результате — сила инерции будет увеличивать ширину шва, а центробежная сила уменьшать удельную массу слоя расплавленного металла и силу трения на границе раздела твердой и жидкой фаз, что приводит к увеличению глубины проплавления.

На рис. 10 показаны для сравнения наплавленные валки с колебаниями и без колебаний изделия. Частота колебаний 12 Гц, амплитуда 1 мм. Масса наплавляемой пластины 2,5 кг. Полученный результат свидетельствует не только о существенных изменениях геометрических размеров наплавленного валика, но и о высоких динамических свойствах манипулятора вибратора, что позволяет достаточно эффек-

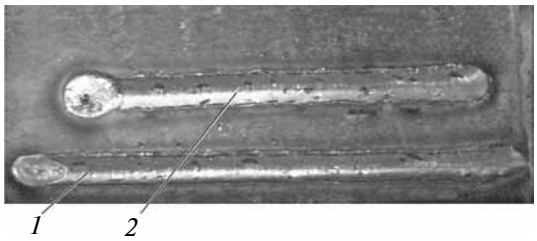


Рис. 10. Наплавленные валики:

1 — без колебаний; *2* — с поперечными колебаниями изделия (f = 12 Гц; A = 1 мм; шов шире в 1,2 раза)

тивно осуществлять колебания ванны в жидкой фазе (до начала кристаллизации металла). Другие интересные явления в формировании наплавленного валика можно ожидать от других форм колебаний.

Экспериментальные исследования показали, что способ наплавки с управляемыми низкочастотными импульсными колебаниями особенно эффективен при выполнении работ по упрочняющей и восстанавливающей наплавке рабочих узлов штампового инструмента.

Дальнейшее развитие способа наплавки и сварки с импульсными управляемыми колебаниями сварочной ванны связано с восстановлением и упрочнением изделий типа тел качения, например валов, где формы колебаний могут быть отличными от тех, которые применяют при наплавке плоских изделий. Широкие возможности по видам колебаний и их параметров ставят задачу выбора оптимальных режимов процесса и наиболее рациональной высокодинамичной конструкции стенда-колебателя. При этом особое внимание следует обратить на решение актуальных задач кристаллизации колеблющейся ванны расплавленного металла с тем, чтобы с помощью рассмотренного способа сварки-наплавки улучшить структуру наплавленного металла, а следовательно, повысить работоспособность свариваемой или наплавляемой конструкции.

Далее расмотрим менее известные способы импульсного воздействия в системах механизированного и автоматического оборудования для сварки плавящимся электродом.

Существует ряд способов и устройств для управления переносом электродного металла и воздействия на сварочную ванну с применением магнитных полей, действующих в импульсном режиме [29].

При сварке тонколистового металла представляет интерес использование внешнего магнитного поля для отклонения или перемещения непрерывно горящей дуги. Внешнее переменное или постоянное магнитное поле, параллельное или перпендикулярное направлению сварки, создается П-образными электромагнитами. При использовании постоянного магнитного поля дугу можно отклонить в любую сторону относительно направления сварки. При отклонении дуги магнитным полем в сторону направления сварки (магнитное поле также параллельно направлению сварки) наблюдается такой же эффект, как и при сварке наклонным электродом — углом вперед. В этом случае при сварке тонколистовой стали уменьшается глубина проплавления.

При отклонении дуги в обратном направлении наблюдается увеличение глубины проплавления, как при сварке с наклоном электрода углом назад. При переменном внешнем магнитном поле дуга колеблется с частотой внешнего магнитного поля. В результате изменяются условия ввода теплоты в изделие и, в частности, ее распределение по поверхности. При колебании дуги поперек направления сварки увеличивается ширина шва, и уменьшается глубина проплавления. Это позволяет сваривать тонколистовой металл. Удобно использовать этот способ для сварки разнородных тонколистовых металлов, таких как медь и сталь и др.

Колебания, сообщаемые расплавленному металлу сварочной ванны, изменяют характер его кристаллизации и способствуют измельчению зерна. В результате улучшаются свойства наплавленного металла. Поэтому этот способ применяют при сварке металлов, характеризующихся крупнозернистым строением металла шва, таких как алюминий, медь, титан и их сплавы. Имеется положительный опыт использования способа и при сварке высокопрочных тонколистовых сталей и сплавов.

Исследования сварки под водой мокрым способом показали, что применение импульсных магнитных полей оказывает положительное влияние на структуру металла шва и это, учитывая современные разработки механизированного и автоматического оборудования для этого способа сварки, имеет хорошую перспективу.

Интересно техническое решение по использованию прерывистой или изменяющейся подачи защитного газа в процессах сварки, где защитный газ выполняет и некоторое регулирование тепловложений [30]. Изменения в режиме подачи защитного газа оказывают

влияние и на характер переноса электродного металла. Отмечается стабилизирующее действие на дугу определенного характера потоков защитного газа [31]. При технической реализации этого способа управления сваркой возникает сложная задача регулирования расхода защитного газа в определенном частотном диапазоне, так как система подачи защитного газа одна из самых инерционных. Примером эффективного, хотя и частичного решения задачи может служить разработка, рассмотренная в работе [32].

Известно положительное влияние на процесс сварки попеременной подачи защитного газа, которую также можно отнести к процессу с импульсным воздействием.

Следует отметить, что для высокодинамичного управления потоками защитного газа при сварке с их модуляцией целесообразно устанавливать клапан газового отсекателя непосредственно в горелке шлангового держателя полуавтомата. Прообразом такого технического решения являются оригинальные разработки ИЭС им. Е.О. Патона с использованием механического управления потоком защитного газа непосредственно в держателе полуавтомата.

Дальнейшее развитие этого эффективного направления импульсного воздействия на процесс дуговой сварки может быть связано с комбинацией других способов импульсного управления.

В заключение необходимо остановиться на комбинированных способах импульсного управления или влияния на сварочный процесс.

В работе [18] рассмотрено несколько вариантов комбинированного импульсного управления процессом сварки в защитных газах с использованием:

— импульсно-дугового синергетического процесса на основе источника сварочного тока с дополнительными движениями механизма подачи, работающему в импульсном режиме по параметрам сварочного процесса [11];

— импульсно-дугового синергетического процесса на основе источника сварочного тока с основными движениями механизма подачи, работающего в импульсном режиме по заранее заданным параметрам [12].

В работе [33] представлено несколько типов комбинаций импульсных воздействий, а также сочетаний импульсных воздействий и других технико-технологических приемов, например импульсной подачи электродной проволоки и модуляции режимов дугового процесса.

Направление, связанное с комбинированными импульсными воздействиями, наименее изучено, хотя наиболее перспективно для дальнейшего применения в технологиях сварки и наплавки. Анализируя новые технические решения, разработчик должен видеть их перспективу, в том числе и с дополнениями, расширяющими возможности этой разработки, на основе комбинации с уже известными технико-технологическими решениями. Примером этому может служить дальнейшее развитие работ по сочетанию нескольких типов механических колебаний в одном процессе: импульсной подачи электродной проволокой и колебаний сварочной ванны с различными способами колебаний.

Заключение. Импульсные методы управления различными аспектами процесса механизированной дуговой сварки и наплавки имеют эффективное направление совершенствования — реализация импульсных методов воздействия, которые можно отнести к наиболее результативным и перспективным.

Практически все системы механизированного и автоматического оборудования, а также средств их транспортирования или манипулирования могут быть целенаправленно модифицированы в целях организации их импульсного функционирования с выбранными теоретически или экспериментально параметрами и дать определенные технико-технологические эффекты.

Одной из наиболее важных задач и направлений исследований при разработке и применении импульсных методов воздействия с рядом параметров является выбор параметров управляющих импульсов, их оптимизация для получения максимального эффекта по определенным критериям, что делает задачу выбора параметров многокритериальной, а следовательно, достаточно сложной.

Одним из наиболее перспективных путей решения проблемы дальнейшего совершенствования импульсных методов управления дуговым процессом является выбор и последующая разработка комбинированных технико-технологических решений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Перспективные** разработки новых технологий и оборудования для импульсно-дуговых методов сварки и наплавки, применяемых для обеспечения качественных и прочностных характеристик неразъемных соединений / Ю.Н. Сараев, В.А. Лебедев, С.Ю. Максимов, А.М. Жерносеков: материалы

11-й Междунар. науч.-техн. конф., 28—30 мая 2014 г. Минск: Беларуская навука, 2014. С. 445—450.

2. **Лебедев В.А.** Управление проплавлением при механизированной сварке и наплавке // Сварочное производство. 2011. № 1. С. 3—11.

3. **Жерносеков А.М.** Тенденции развития и управления процессами переноса металла в защитных газах (Обзор) // Автоматическая сварка. 2012. № 1. С. 33—38.

4. **Патон Б.Е.** Современные направления исследований и разработок в области сварки и прочности конструкций // Автоматическая сварка. 2003. № 10—11. С. 7—13.

5. **Воропай Н.М.** Параметры режимов и технологические возможности дуговой сварки с импульсной подачей электродной и присадочной проволоки // Автоматическая сварка. 1996. № 10. С. 3—9.

6. **Wu Y., Kovacevic R.** Mechanically assisted droplet transfer process in gas metal arc welding // Engineering Manufacture. Research Center for Advanced Manufacturing, Southern Methodist University, Dallas, Texas, USA. Vol. 216. Part B.

7. **Лебедев В.А., Пичак В.Г., Смолярко В.В.** Механизмы импульсной подачи электродной проволоки с регулированием параметров импульсов // Автоматическая сварка. 2001. № 5. С. 31—37.

8. **Тарасов Н.М., Тулин В.М.** Управление переносом электродного металла кратковременным повышением скорости истечения защитного газа // Сварочное производство. 1982. № 8. С. 23—25.

9. **Денисов Л.С., Барсуков И.В., Аполоник С.А.** Разработка и анализ оборудования для сварки с попеременной подачей газов // Прогрессивная техника и технология машиностроения, приборостроения и сварочного производства: тр. науч. конф. Киев, 1998. Т. 4. С. 310—313.

10. **Рыжов Р.Н., Кузнецов В.Д.** Внешние электромагнитные воздействия в процессах дуговой сварки и наплавки (Обзор) // Автоматическая сварка. 2006. № 6. С. 36—44.

11. **Бондаренко В.Л.** Дуговая сварка с импульсной подачей электродной проволоки — процесс СМТ, предложенный фирмой "Фрониус" // Автоматическая сварка. 2004. № 12. С. 55—58.

12. **Патон Б.Е., Лебедев В.А., Микитин Я.И.** Способ комбинированного управления процессом переноса электродного металла при механизированной дуговой сварке // Сварочное производство. 2006. № 8. С. 27—32.

13. **Шейко П.П., Жерносеков А.М., Шимоновский Ю.И.** Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом с автоматической стабилизацией параметров режимов // Автоматическая сварка. 2004. № 1. С. 8—11.

14. **Amin M.** Synergic MIG welding // Metal Construction. 1981. 13. № 6. P. 349—353.

15. **Allen W.H.** Synergic MIG finds application across Industry // Weld. Rev. 1985. № 4. P. 294.

16. **Lucas Head W.** Synergic pulsed MIG welding-process, equipment and application // FWP J. 1985. № 6. P. 7—23.

17. **Новые** высокопроизводительные технологии сварки фирмы "Фрониус" // Автоматическая сварка. 2004. № 7. С. 39—46.

18. **Лебедев В.А.** Тенденции развития механизированной сварки с управляемым переносом электродного металла (Обзор) // Автоматическая сварка. 2010. № 10. С. 46—53.

19. **Сараев Ю.Н., Безбородов В.П., Демьянченко А.А.** Управление микрометаллургическими процессами при адаптивной импульсно-дуговой сварке легированных сталей // Перспективные материалы. 2011. № 13. С. 290—295.

20. **Можайский В.А., Колюпанов О.В., Квасов Ф.В.** Сварочное оборудование фирмы Lincoln Electric // Сварочное производство. 1998. № 8. С. 37—41.

21. **Универсальный** источник питания для дуговой сварки и плазменной резки / А.В. Владимиров, В.А. Хабузов, В.А. Лебедев, С.Ю. Максимов, А.А. Галышев // Автоматическая сварка. 2011. № 1. С. 41—46.

22. **Воропай Н.М.** Принципы построения устройств для импульсной подачи сварочной проволоки // Автоматическая сварка. 1998. № 8. С. 25.

23. **Лебедев В.А., Максимов С.Ю.** Современное механизированное оборудование для сварки и наплавки и его технико-технологические возможности. Киев: Основа, 2012. 392 с.

24. **Лебедев В.А., Рымша В.В., Радимов И.Н.** Современные вентильные электроприводы в системах механизированного сварочного оборудования // Електромашинобудування та Електрообладнання. Випуск 74. Київ: Техніка, 2009. С. 22—24.

25. **Лебедев В.А.** Механизированная и автоматическая синергетическая сварка с импульсной подачей электродной проволоки // Сварочное производство. 2013. № 2. С. 13—19.

26. **Повышение** стойкости металла шва к межкристаллитной коррозии / А.М. Файрушин, М.З. Зарипов, Д.В. Каретников, Р.М. Ахтямов, К.И. Скорнякова // Экологический вестник России. 2010. Вып. 10, ноябрь. С. 16—18.

27. **Пат.** на полезную модель № 64371 UA, МПК B23K 13/00. Способ наплавки деталей / Ч.В. Пулька, В.С. Сенчишин. Бюл. № 21 від 10.11.2011.

28. **Универсальный** манипулятор с возможностью низкочастотной вибрационной обработки сварочной ванны: пат. на полезную модель. В.О. Лебедев, С.Ю. Максимов, І.В. Лендел / опубл. 10.06.2013, Бюл. № 11.

29. **Тарасов Н.М., Капустин С.С.** Применение высокочастотного электромагнитного поля для дозированного переноса капель электродного металла // Автоматическая сварка. 1982. № 8. С. 10—12.

30. **Островский О.Е., Новиков О.М.** Новый метод дуговой сварки с импульсной подачей защитных газов // Сварочное производство. 1994. № 11. С. 10—12.

31. **Дуговая** сварка с импульсной подачей защитных газов /О.М. Новиков, О.Е. Островский и др. // Сварочное производство. 1992. № 10. С. 9—10.

32. **Шейко П.П., Жерносеков А.М., Шевчук С.А.** Технологические особенности сварки плавящимся электродом низколегированных сталей с чередующейся подачей защитных газов // Автоматическая сварка. 1997. № 8. С. 32—36.

33. **Лебедєв В.О.** Використання комбінації впливів та суміщення процесів при вдосконаленні техніки і технології дугового зварювання та наплавлення (огляд та пропозиції) // Вісті Академії інженерних наук України. 2008. № 3. С. 3—11.

Владимир Александрович Лебедев, д-р техн. наук,
valpaton@ukr.net;
Юрий Николаевич Сараев, д-р техн. наук;
Станислав Владимирович Драган, канд. техн. наук;
Олег Анатольевич Козырко

УДК 621.979; 621.735.32; 621.735.004

А.Д. Хван *(Воронежский государственный университет)*,
Д.В. Хван *(Воронежский государственный технический университет)*,
Д.А. Гехтман *(ОАО "Тяжмехпресс", г. Воронеж)*

Модернизированный пресс для штамповки с кручением

Рассмотрен модернизированный пресс для штамповки с кручением, включающий в себя дополнительную опору в виде плоского кольца к упорам в целях увеличения нагрузки на обрабатываемую заготовку, а также червячный привод для регулирования скорости вращения вспомогательного верхнего маховика. Приведена методика расчетов диаметра упоров и отношения угловой деформации к линейной в пластически обрабатываемой заготовке.

Ключевые слова: пресс; штамповка с кручением; приводной маховик; винт; угловая скорость; балка; упор; эпюра изгибающих моментов.

The modernized press for torsion forming including additional support in the form of flat ring to emphasis for the purpose of increase in load of the processed preparation, and also the worm drive for regulation of rotation speed of auxiliary top flywheel is considered. The technique of calculations of emphasis diameter and the relation of angular deformation to linear in plastically processed preparation is given.

Keywords: press; torsion forming; driving flywheel; screw; angular speed; beam; emphasis; diagram of bending moments.

В последние десятилетия для повышения несущей способности многих деталей цилиндрической формы в производство внедряют инновационные технологии *предварительной термомеханической обработки* (ПТМО), основанные на пластическом деформировании заготовок перед термической обработкой. Применение этих технологий в промышленности позволяет увеличивать износостойкость деталей типа зубчатых колес, стойкость инструментов в 1,5—2 раза.

В работе [1] отмечено, что наибольший эффект повышения эксплуатационных свойств деталей достигается при использовании в технологии ПТМО пластической обработки в виде сочетания деформаций осадки и сдвига.

Внедрение в производство данной технологии требует разработки соответствующего прессового оборудования. В конструкции пресса для комбинированного нагружения [2] показана техническая идея реализации процесса осадки с кручением цилиндрических заготовок и поэтому с точки зрения практического применения при проектировании прессового оборудования она несовершенна. В связи с этим в данной статье рассмотрено эффективное конструктивное решение, использованное при разработке пресса применительно к производственным условиям.

Пресс (рис. 1), расположенный на станине *1*, содержит привод, муфту и тормоз (не показаны). С приводом связан маховик *2*, в центральном резьбовом отверстии которого установлен с возможностью перемещения параллельно оси маховика винт *3*. Верхней концевой частью некруглого сечения винт *3* вставлен в соответствующее некруглое отверстие верхнего маховика *4*, установленного по скользящей посадке в станине, и образует с ним поступательную пару.

На подпятнике *5* ползуна *6* параллельно оси винта *3* закреплены не менее двух упоров *7* цилиндрической формы, свободные концы которых установлены по скользящей посадке в соответствующих отверстиях маховика *2*. Винт *3* нижней концевой частью закреплен

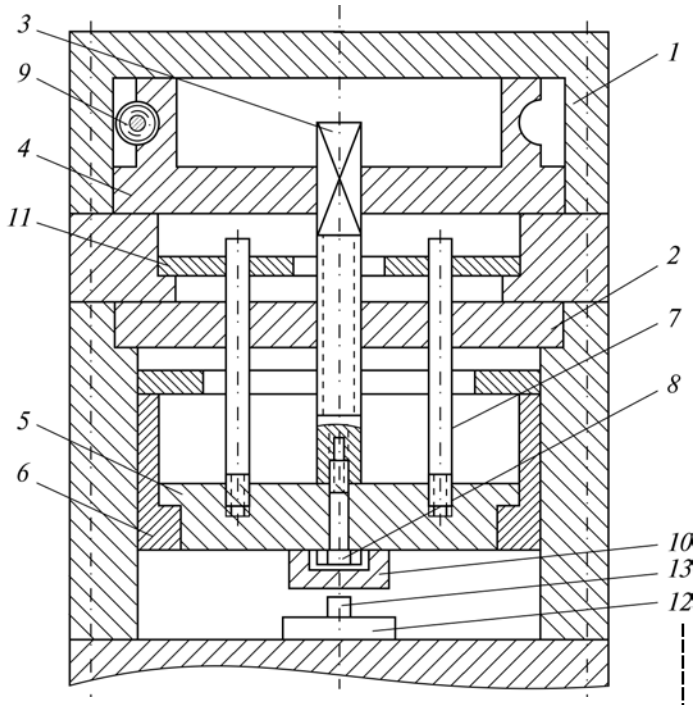


Рис. 1. Конструктивная схема пресса

посредством болта *8* на подпятнике *5* и образует с ним цилиндрическую шарнирную пару. При этом подпятник *5* может свободно вращаться относительно болта *8*, жестко соединенного с винтом *3*.

В основании корпуса *1* пресса устанавливают нижнюю часть штампа *12* с необходимыми матрицами (не показаны).

Для реализации возможности автономного регулирования угловой скорости вращения верхнего маховика *4* в корпусе *1* пресса установлена червячная передача, включающая в себя изготовленное за одно целое с маховиком *4* червячное колесо и установленный по скользящей посадке в закрепленных на станине двух кронштейнах (не показаны) червяк *9*.

В конструкции пресса [2] упоры *7* жестко закреплены на подпятнике *5* и представляют собой консольную балку длиной ($l_1 + l_2$), нагруженную силой P_1 от приводного маховика *2* (рис. 2). Размер l_1 — расстояние от подпятника *5* до маховика *2*.

С точки зрения возможности увеличения нагрузок на упоры при одной и той же их прочности данная схема крепления упоров является не оптимальной. Поэтому в станине пресса дополнительно устанавливают по скользящей посадке плоское кольцо *11*, в отверстия которого вставляют также по скользящей посадке концевые части упоров *7*, в результате чего последние можно рассматривать как двухопорную балку (рис. 3). Здесь левая (нижняя) опора представляет собою заделку, а правая (верхняя) — заделку с возможностью перемещаться в осевом направлении. Размер l_2 — это расстояние между приводным маховиком *2* и кольцом *11*.

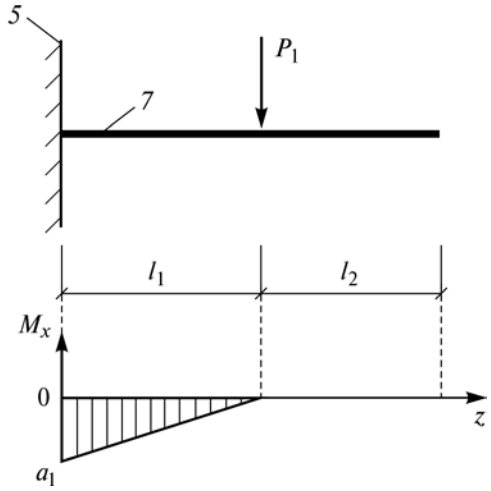


Рис. 2. Схема консольной балки

Данная балка является дважды статически неопределимой. Раскрыв статическую неопределимость этой системы методами сопротивления материалов (см. кн.: Федосьев В.И. Сопротивление материалов. М.: Наука, 1986. 508 с.), можно получить эпюру изгибающих моментов (см. рис. 3), где a_2, b_2, c_2 — значения изгибающих моментов в левой опоре, в точ-

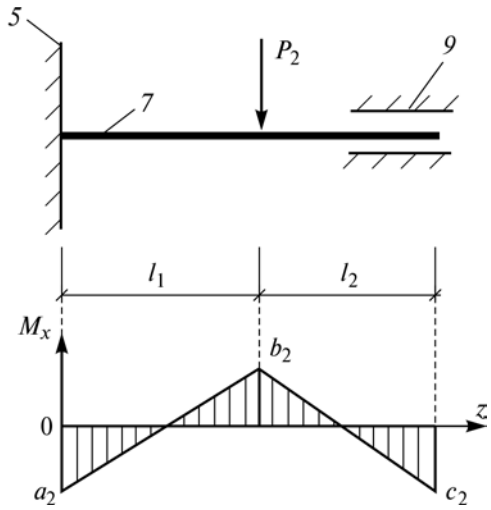


Рис. 3. Схема двухопорной балки

ке приложения нагрузки P_2 и на правой опоре соответственно:

$$a_2 = \frac{P_2 l_1 \alpha^2}{(1+\alpha)^2};\ b_2 = \frac{2P_2 l_1 \alpha^2}{(1+\alpha)^3};\ c_2 = \frac{P_2 l_1 \alpha^2}{(1+\alpha)^2}, \quad (1)$$

где $\alpha = l_2/l$.

Для консольной балки (см. рис. 2) значения изгибающего момента следующие:

$$a_1 = P_1 l_1;\ b_1 = c_1 = 0. \quad (2)$$

Из соотношений (1) следует, что при

$\alpha = 0{,}5$:

$$a_2 = 0{,}111 P_2 l_1;\ b_2 = 0{,}148 P_2 l_1;\ c_2 = 0{,}222 P_2 l_1;$$

$\alpha = 1{,}0$:

$$a_2 = b_2 = c_2 = 0{,}25 P_2 l_1;$$

$\alpha = 1{,}5$:

$$a_2 = 0{,}30 P_2 l_1;\ b_2 = 0{,}29 P_2 l_1;\ c_2 = 0{,}24 P_2 l_1.$$

Из анализа этих данных следует, что с точки зрения обеспечения равной прочности балки в опорах и точке приложения нагрузки P_2 ($a_2 = b_2 = c_2$) оптимальным является приложение нагрузки посередине между опорами, т.е. когда приводной маховик *2* располагается посередине между подпятником *5* и кольцом *11*.

В процессе деформирования заготовки подпятник *5* вместе с пуансоном будет перемещаться вниз и расстояние l_1 будет увеличиваться при неизменном размере l_2, т.е. параметр α будет уменьшаться. Однако это уменьшение будет незначительным и связанным с осадкой заготовки Δh и зазором между торцевыми поверхностями пуансона и заготовки Δ.

Тогда на конечной стадии деформирования заготовки расстояние между подпятником *5* и приводным маховиком *2* будет равным

$$l_1' = l_1 + \Delta h + \Delta,$$

а параметр α составит $l_2/(l_1 + \Delta h + \Delta)$.

Сопоставив нагрузки на упоры по двум вариантам крепления в корпусе P_1 и P_2, исходя из равенства $a_1 = a_2$ (при $\alpha = 1$), определяющего равную прочность упоров, получим $P_2 = 4P_1$.

Таким образом, при установке на прессе дополнительной опоры на упорах в виде кольца *11* нагрузку на них при этом можно увеличивать в 4 раза по сравнению с нагрузкой в первом варианте установки упоров (по консольной схеме) при одних и тех же геометрических размерах последних.

Рассмотрев условие прочности упоров *7* согласно теории изгиба, получим формулу для расчета диаметра упоров (при $\alpha = 1$)

$$d \geqslant \sqrt[3]{\frac{8Pl_1}{\pi[\sigma]}}, \quad (3)$$

где $[\sigma]$ — допускаемое напряжение материала упоров.

Нагрузку P на упоры можно определить, исходя из равенства прикладываемого к заготовке крутящего момента M_k и момента от этой нагрузки относительно оси приводного маховика *2*:

$$P = M_k/nL, \quad (4)$$

где L — расстояние между осями упоров, установленных в диаметральном направлении;

$n = 2; 4; 6; \ldots$ — число упоров.

Подставив это выражение в соотношение (3), получим формулу для расчета диаметра упора при проектировочном расчете

$$d \geqslant \sqrt[3]{\frac{8M_k l_1}{\pi n L[\sigma]}}. \quad (5)$$

Крутящий момент в этом выражении можно определить согласно решению задачи об осадке с кручением цилиндрических заготовок [4].

Пресс может работать по двум режимам. При реализации первого режима в момент запуска пресса червячная передача отключена, а приводной маховик *2* вращается с угловой скоростью ω_2. В связи с этим винт *3* благодаря винтовой передаче перемещается только вниз с максимальной линейной скоростью

$$v_{max} = \frac{pk\omega_2}{2\pi}, \quad (6)$$

где p, k — шаг и число заходов резьбы соответственно.

После выбора зазора между торцами пуансона и заготовки Δ включается червячная передача для вращения червячного колеса *4* с винтом *3* в направлении движения приводного маховика с угловой скоростью ω_3. При этом скорость вращения винта *3* с червячным колесом относительно приводного маховика *2*

равна $\Delta\omega_3 = \omega_2 - \omega_3$, а линейная скорость движения винта *3* с подпятником *5* и пуансоном составит

$$v_3 = \frac{\Delta\omega_3 pk}{2\pi} = \frac{pk(\omega_2 - \omega_3)}{2\pi}. \quad (7)$$

Скручивание заготовки после соприкосновения закрепленного на подпятнике *5* пуансона (на рис. 1 не показан) к заготовке осуществляется за счет радиальных острых рисок на торце пуансона и жесткой взаимосвязи приводного маховика *2* с подпятником *5* через упоры *7* с постоянной угловой скоростью ω_2.

Для оценки соотношения между угловой и линейной (относительной) деформациями в обрабатываемой заготовке можно ввести следующий параметр:

$$\beta = \frac{\gamma_{max}}{\varepsilon}, \quad (8)$$

где γ_{max} — максимальная угловая деформация на боковой поверхности заготовки; ε — относительная деформация.

На основе теории пластичности для рассматриваемого процесса деформирования запишем следующие выражения:

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{V_3 t}{h_0}; \\ \gamma_{max} &= \frac{\omega_2 rt}{h}, \end{aligned}\right\} \quad (9)$$

где h_0, h, r — исходная, текущая высоты заготовки и ее текущий радиус соответственно; t — время деформирования заготовки, отсчитываемое с момента начала соприкосновения пуансона с заготовкой.

После подстановки выражений (7) и (9) в соотношение (8) и соответствующих преобразований получим уравнение параметра β в виде

$$\beta = \frac{\omega_2 r_0 h_0^{3/2} (2\pi)^{5/2}}{\left[2\pi h_0 - pk(\omega_2 - \omega_3)t\right]^{3/2} pk(\omega_2 - \omega_3)}. \quad (10)$$

Этот параметр при заданных постоянных значениях всех характеристик, входящих в это уравнение, с увеличением времени процесса обработки заготовки будет возрастать, начиная с некоторого значения β_0 при $t_0 = 0$. В данном случае:

$$\beta_0 = \frac{\omega_2 r_0 2\pi}{pk(\omega_2 - \omega_3)}. \quad (11)$$

При реализации второго режима работы пресса приводы червячной передачи и маховика *2* включаются одновременно, обеспечивая равные угловые скорости вращения этого маховика и червячного колеса *4*. Винт *3* с червячным колесом не будут перемещаться в осевом направлении, т.е. $v_3 = 0$.

Далее уменьшают скорость вращения червячного колеса с винтом *10* на величину ω'_3, вследствие чего скорость движения винта *10* вниз составит

$$v'_3 = \frac{pk\omega'_3}{2\pi}. \quad (12)$$

Тогда уравнение (8) в этом случае примет вид

$$\beta' = \frac{\omega_2 r_0 h_0^{3/2} (2\pi)^{5/2}}{\left[2\pi h_0 - pk\omega'_3 t\right]^{3/2} pk\omega'_3}, \quad (13)$$

где время t также отсчитывается с момента соприкосновения пуансона к заготовке. Эта функция также монотонно возрастает со значения β'_0 при $t = 0$

$$\beta'_0 = \frac{\omega_2 r_0 2\pi}{pk\omega'_3}. \quad (14)$$

Таким образом, задавая угловые скорости ω_2, ω_3 и ω'_3, можно получить с течением времени t различные значения параметров β при реализации двух режимов работы пресса.

В качестве примера определения параметров β и β' рассмотрим пластическую обработку заготовки осадкой с кручением с исходными данными $h_0 = 40$ мм; $r_0 = 25$ мм; $p = 10$ мм; $k = 1$; $\omega_2 = 2$ с$^{-1}$.

На рис. 4 показаны графики изменения параметров β и β', где *1*, *2*, *3* и (*1*), (*2*), (*3*) относятся соответственно к первому и второму режимам работы пресса.

Из представленных на рис. 4 графиков следует, что при работе пресса по первому режиму с увеличением скорости ω_2 параметр β увеличивается, а по второму режиму с ростом скорости ω'_3 параметр β' уменьшается. Эти параметры при постоянных значениях угловых скоростей ω_2, ω_3 и ω'_3 меняются с течением времени почти линейно. Время обработки заготовки принято приближенно 2 с.

Таким образом, предлагаемый модернизированный пресс для штамповки с кручением позволяет пластически осаживать заготовку с заданными оптимальными значениями угло-

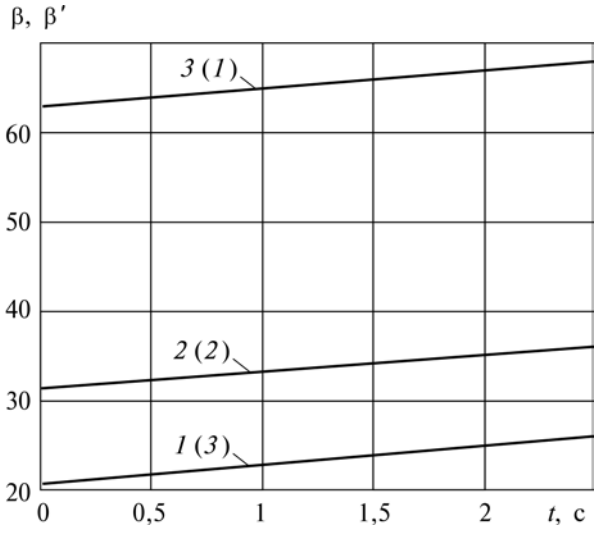


Рис. 4. График изменения параметров β и β′ при различных значениях угловых скоростей $\omega'_3 = \omega_2 - \omega_3$:
1 — 0,5 c^{-1}; *2* — 1,0 c^{-1}; *3* — 1,5 c^{-1}

вых и линейных деформаций, обеспечивающих максимальное увеличение эксплуатационных свойств деталей.

Выводы

1. Разработана модернизированная конструкция пресса для штамповки с кручением применительно к реальным условиям на производстве.

2. В целях увеличения несущей способности пресса в конструкции пресса вводится вторая опора для упоров в виде плоского кольца.

3. Для анализа процесса работы пресса введен параметр, характеризующий отношение угловых и линейных деформаций в обрабатываемой заготовке и зависящий от ее геометрических размеров и угловых скоростей вращения базовых деталей пресса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Хван А.Д., Панин П.М.** Пресс для комбинированного нагружения при обработке металлов давлением // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2011. № 10. С. 36—39.

2. **Штамповка** с кручением / В.Н. Субич, В.А. Демин, Н.А. Шестаков, А.В. Власов М.: Изд-во МГИУ, 2008. 411 с.

3. **Дмитриев А.М., Крук А.Т., Хван А.Д.** Улучшение эксплуатационных и технологических свойств элементов конструкций пластическим деформированием. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2011. 214 с.

Александр Дмитриевич Хван, д-р техн. наук,
tpm@vorstu.ru;
Дмитрий Владимирович Хван, д-р техн. наук;
Дмитрий Алексеевич Гехтман

УДК 621.979-82

М.Е. Гойдо, В.В. Бодров, Р.М. Багаутдинов
(ООО "Уральский инжиниринговый центр", г. Челябинск)

Технические решения для улучшения характеристик работы гидроприводов прессов

Приведена информация о новых схемных и конструктивных решениях, защищенных патентами Российской Федерации и направленных на снижение потерь энергии, предотвращение гидравлических ударов, уменьшение перегрузок при работе мощных гидравлических прессов.

Ключевые слова: гидропривод пресса; предотвращение гидравлического удара; снижение потерь энергии; защита от перегрузки; уменьшение динамики при исчезновении рабочей нагрузки.

The information about new schematic and design solutions protected by patents of the Russian Federation and to reduce energy loss, prevent water hammer, reducing overloads while working powerful hydraulic presses is presented.

Keywords: hydraulic press; prevent water hammer; reduction of energy losses; overload protection; reduction of dynamics when disappearance of workload.

Мощные гидравлические прессы силой 10 МН и более широко применяют в промышленности для производства и правки заготовок и готовых изделий из различных материа-

лов. Совершенствование гидроприводов таких прессов в основном осуществляется по двум направлениям:

1) по пути изменения применяемых схемных решений; 2) по пути изменения конструкции отдельных гидравлических устройств, входящих в состав гидропривода.

В настоящее время наибольшее распространение имеют прессы с насосно-аккумуляторным гидроприводом. Во время выполнения операций с использованием рабочей жидкости высокого давления, поступающей из гидроаккумулятора, коэффициент полезного действия (КПД) такого гидропривода при типовом его исполнении в значительной степени зависит от разности давления $p_а$ в гидроаккумуляторе и давления $p_{гд}$ в напорной полости гидродвигателя, посредством которого выполняется текущая рабочая операция, и увеличивается при уменьшении этой разности (до определенного предела Δp) [1]. В связи с этим одним из путей снижения потерь энергии при работе насосно-аккумуляторного гидропривода является изменение давления $p_а$ таким образом, чтобы разность ($p_а - p_{гд}$) была как можно меньше, но не меньше значения Δp.

Одно из известных технических решений, позволяющих изменять в процессе работы насосно-аккумуляторного гидропривода давление $p_а$ в соответствии с изменениями давления $p_{гд}$ в напорной полости гидродвигателя, заключается в использовании в составе гидропривода двух или более секций гидроаккумуляторов с различными уровнями давления.

При небольшом требующемся маневровом объеме рабочей жидкости по отношению к номинальной вместимости пневмогидравлического аккумулятора возможно согласование давления $p_а$ с давлением в напорной полости гидродвигателя путем изменения степени заполнения аккумулятора рабочей жидкостью (см. кн.: Кармацкий Ю.И., Коровин Е.А. Насосно-аккумуляторные станции. Конструкция и расчет. М.: Машиностроение, 1965. 344 с.).

Известно также техническое решение, заключающееся в изменении давления газа в пневмогидравлическом аккумуляторе с помощью вспомогательных гидробаллонов, газовые полости которых соединены с газовой полостью аккумулятора, а в жидкостных полостях соответствующим образом изменяется количество жидкости.

При использовании всего лишь одного уровня давления $p_а$ в жидкостной полости гидроаккумулятора потери энергии в процессе работы насосно-аккумуляторного гидропривода в определенной степени можно уменьшить, если в гидролинии, соединяющей жидкостную полость гидроаккумулятора с напорной гидролинией привода, установить дросселирующий гидрораспределитель (рис. 1) и посредством его осуществлять тонкую регулировку расхода рабочей жидкости, поступающей к гидродвигателю, а грубую регулировку расхода осуществлять путем изменения числа насосов, от которых жидкость непосредственно подается к гидродвигателю. При таком исполнении гидропривода при поступлении рабочей жидкости к гидродвигателю от насосной установки или одновременно от гидроаккумулятора и от насосной установки давление в напорном канале насосной установки оказывается близким к давлению в напорной полости гидродвигателя [1].

В процессе рабочего хода подвижной траверсы пресса вследствие упругих деформаций нагружаемых при этом металлоконструкций пресса и сжимаемости рабочей жидкости, находящейся в рабочих гидроцилиндрах и присоединенных к ним трубопроводах, в указанных металлоконструкциях и жидкости накапливается значительная потенциальная энергия (см. кн.: Добринский Н.С. Гидравлический привод прессов. М.: Машиностроение, 1975. 222 с.).

Как правило, в процессе разгрузки рабочих гидроцилиндров от высокого давления (путем соединения полостей гидроцилиндров с баком наполнения посредством наполнительно-сливного клапана) вся эта механическая энергия преобразуется в тепловую энергию, вызывая повышенный нагрев рабочей жидкости. При этом существует опасность возникновения интенсивного гидравлического удара в наполнительно-сливной гидролинии, соединяющей наполнительно-сливной клапан с баком наполнения.

С учетом случайных изменений ряда факторов, влияющих на характеристики переходных процессов в наполнительно-сливной гидролинии после соединения ее с полостями рабочих гидроцилиндров по окончании рабочего хода подвижной траверсы пресса, наиболее предпочтительным с точки зрения предотвращения указанного выше гидравлического удара является обеспечение автоматического изменения площади проходного сечения сливного клапана (при наличии управляющего сигнала на его открытие) в функции давления жидкости в канале клапана со стороны наполнительно-сливной гидролинии, например, путем выполнения сливного клапана

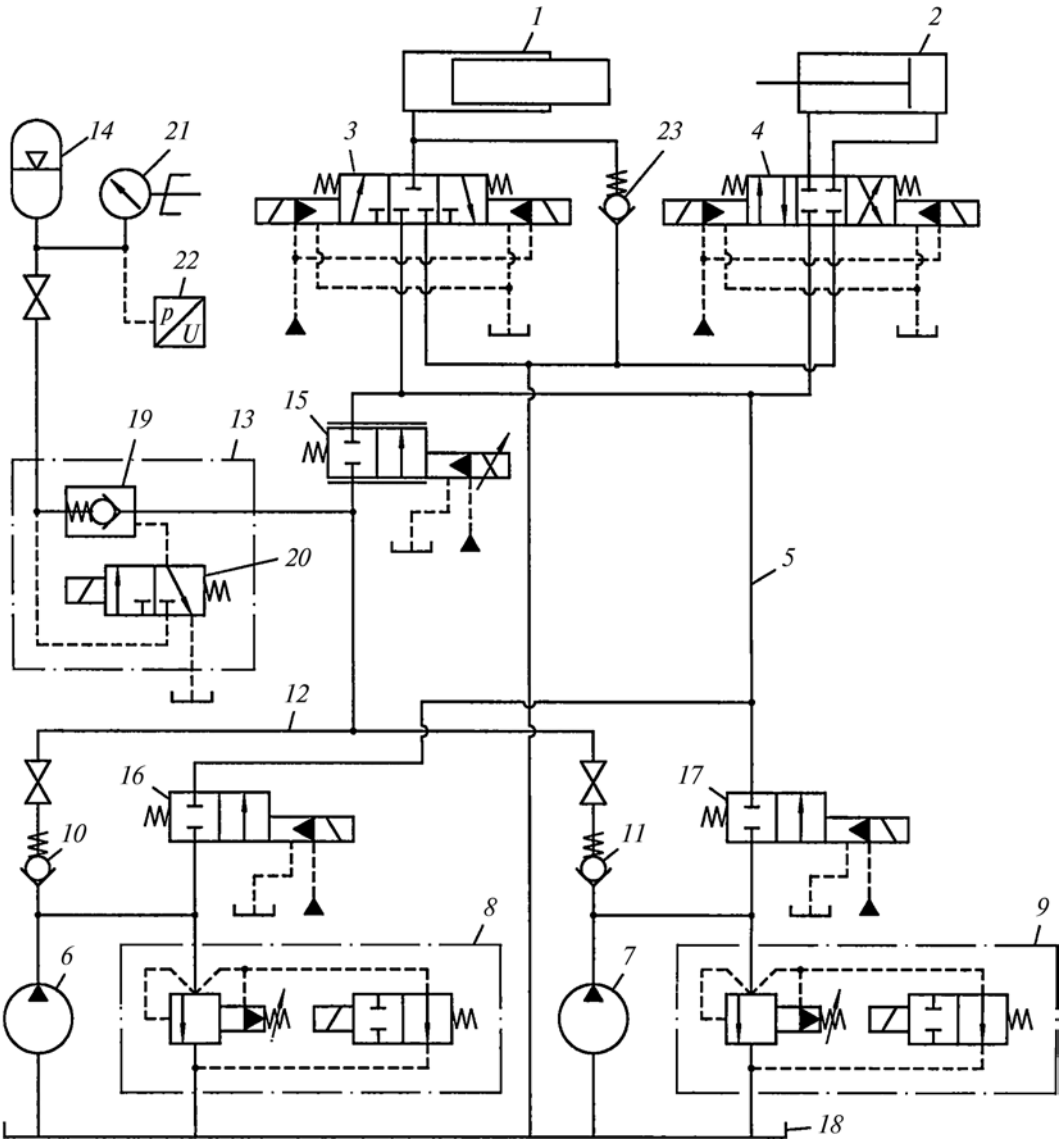


Рис. 1. Принципиальная схема насосно-аккумуляторного гидропривода с подключением гидроаккумулятора к напорной гидролинии привода через дросселирующий гидрораспределитель (пат. 2421637 RU):

1, *2* — гидроцилиндры; *3*, *4*, *16*, *17*, *20* — направляющие гидрораспределители; *5* — напорная гидролиния; *6*, *7* — насосы; *8*, *9* — предохранительные клапаны; *10*, *11*, *23* — обратные клапаны; *12* — общий напорный коллектор насосов; *13* — автоматический запорный клапан; *14* — пневмогидравлический аккумулятор; *15* —дросселирующий гидрораспределитель; *18* — гидробак; *19* — гидрозамок; *21* — электроконтактный манометр; *22* — датчик давления

в виде гидроаппарата, функционально подобного редукционному клапану (рис. 2) [2]. Однако при использовании сливного клапана подобной конструкции продолжительность разгрузки рабочих гидроцилиндров от высокого давления может оказаться повышенной, что нежелательно для быстроходных прессов, поскольку отрицательно сказывается на их производительности.

Гидравлические удары в наполнительно-сливной гидролинии возникают также после закрытия проходного сечения наполнительно-сливного клапана по окончании холостого хода подвижной траверсы пресса.

Обычно для снижения максимального повышения давления при гидравлических ударах в гидросистемах прессов широко применяют компенсаторы гидроударов.

При прочих равных условиях снизить мощность гидравлического удара в наполнительно-сливной гидролинии пресса после ее соединения с полостями рабочих гидроцилиндров по окончании рабочего хода возможно путем предварительного подключения указанных полостей к жидкостной полости установленного в непосредственной близости от гидроцилиндров пневмогидравлического аккумулятора, изоли-

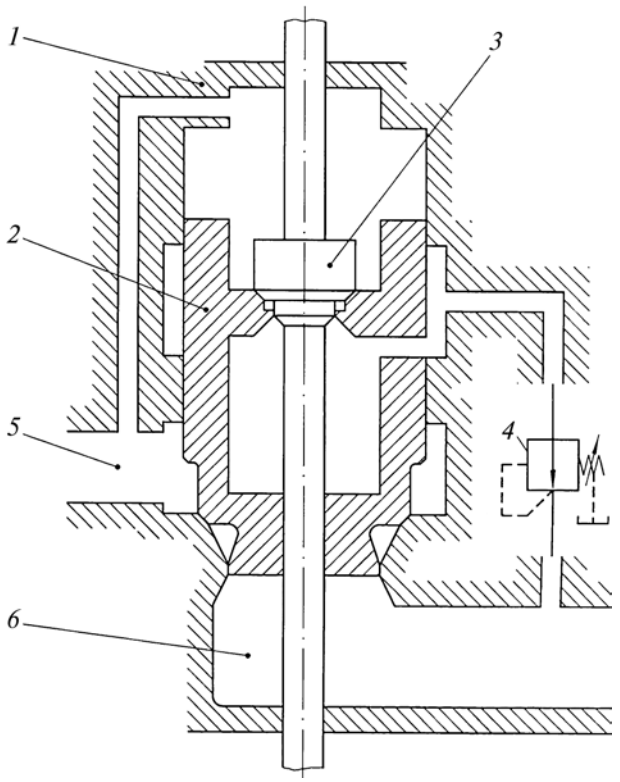


Рис. 2. Конструктивная схема сливного клапана, ограничивающего максимальное давление в наполнительно-сливной гидролинии пресса после ее соединения с полостями рабочих гидроцилиндров по окончании рабочего хода подвижной траверсы (пат. 2186262 RU):

1 — корпус; *2*, *3* — соответственно основной и управляющий запорно-регулирующие элементы; *4* — редукционный клапан прямого действия; *5* — канал для соединения сливного клапана с полостями рабочих гидроцилиндров пресса; *6* — канал для соединения клапана с наполнительно-сливной гидролинией

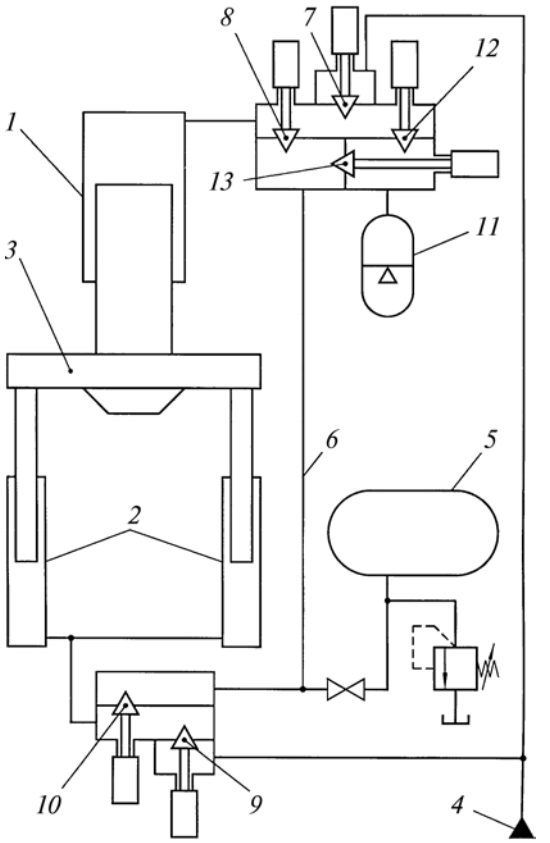


Рис. 3. Упрощенная схема гидропривода пресса с устройством предварительной разгрузки рабочего гидроцилиндра от высокого давления (пат. 2078640 RU):

1 — рабочий гидроцилиндр; *2* — возвратный гидроцилиндр; *3* — подвижная траверса; *4* — источник рабочей жидкости высокого давления; *5* — бак наполнения; *6* — наполнительно-сливная гидролиния; *7*, *8* — соответственно напорный и наполнительно-сливной клапаны рабочих гидроцилиндров; *9*, *10* — соответственно напорный и сливной клапаны возвратных гидроцилиндров; *11* — пневмогидравлический аккумулятор; *12*, *13* — клапаны для соединения и разобщения жидкостной полости пневмогидравлического аккумулятора *11* соответственно с полостями рабочих гидроцилиндров *1* и с наполнительно-сливной гидролинией *6*

рованной при этом от наполнительно-сливной гидролинии посредством дополнительного клапанно-распределительного устройства (рис. 3). В данном случае разгрузка рабочих гидроцилиндров от высокого давления может быть проведена быстро. Этот же пневмогидравлический аккумулятор, подключенный к наполнительно-сливной гидролинии, можно использовать для снижения интенсивности гидравлического удара в ней после закрытия проходного сечения наполнительно-сливного клапана по окончании холостого хода подвижной траверсы пресса.

Энергия, запасенная в аккумуляторе после подключения к его жидкостной полости полостей рабочих гидроцилиндров по окончании рабочего хода подвижной траверсы пресса, может в дальнейшем использоваться в той или иной степени для совершения полезной работы во время холостого хода или на начальном этапе рабочего хода подвижной траверсы пресса.

Для этого после повышения давления в аккумуляторе до установленного значения достаточно временно (до начала соответствующего этапа технологического цикла работы пресса) изолировать жидкостную полость аккумулятора от полостей рабочих гидроцилиндров и наполнительно-сливной гидролинии. Однако энергия, запасаемая в аккумуляторе, имеет существенно меньшее значение по сравнению с величиной уменьшения потенциальной энергии упругих деформаций жидкости и металлоконструкций пресса при соответствующем понижении давления в полостях рабочих гидроцилиндров [2].

Снизить потери потенциальной энергии упругих деформаций жидкости и металлоконструкций пресса, накопленной во время рабочего хода, можно, выполнив гидропривод пресса с устройством (типа мультипликатора с автоматически изменяющимся коэффициентом мультипликации), позволяющим преобразовать указанную энергию в энергию жидкости высокого давления, возвращаемой в напорную гидролинию пресса (рис. 4).

Наиболее совершенной является конструкция устройства преобразования энергии, выполненная в виде гидромотора и насоса, валы которых соединены между собой посредством муфты. При этом входной канал гидромотора с помощью управляемого клапана соединен с рабочей полостью рабочего гидроцилиндра, а выходной канал — со сливной гидролинией, входной канал насоса соединен с баком наполнения, а выходной канал через обратный клапан — с напорной гидролинией пресса, одна из указанных гидромашин выполнена регулируемой с электрическим пропорциональным управлением и ее электрический узел управления соединен с выходом входящего в состав системы управления пресса контроллера, соответствующие входы которого соединены с выходами датчика давления в рабочей полости рабочего гидроцилиндра, датчика положения регулирующего органа регулируемой гидромашины и датчика угловой скорости вращения валов гидромашин (рис. 5).

При работе гидропривода, оснащенного таким устройством, сохранение (для последующего использования) потенциальной энергии, накопленной вследствие упругих деформаций жидкости и металлоконструкций пресса во время рабочего хода, обеспечивается при ее минимальных потерях и вне зависимости от значения давления в рабочем гидроцилиндре по окончании рабочего хода подвижной траверсы, что повышает энергетическую эффективность гидропривода пресса в целом. Кроме того, конструкция рассматриваемого устройства позволяет регулировать интенсивность и продолжительность процесса преобразования указанной выше потенциальной энергии.

Для ограничения повышения давления в рабочих полостях возвратных гидроцилиндров сверх давления в напорной гидролинии пресса некоторой допустимой величиной в гидросистеме пресса обычно применяют обратный клапан, соединенный своим входным каналом с полостями возвратных гидроцилиндров, а выходным каналом — с напорной гидролинией (см. рис. 4, 5).

Такое повышение давления возможно в следующих случаях:

а) при резком торможении подвижной траверсы пресса и движущихся вместе с ней частей при быстром закрытии проходного сечения сливного клапана возвратных гидроцилиндров (вследствие чего кинетическая энергия подвижной траверсы и движущихся вместе с ней частей преобразуется в потенциальную энер-

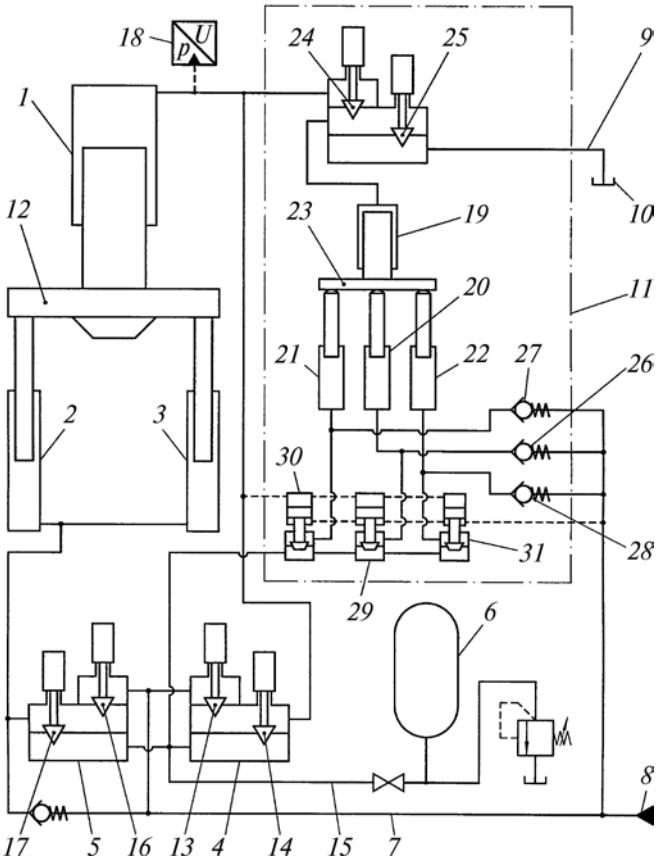


Рис. 4. Упрощенная схема гидропривода с устройством преобразования потенциальной энергии упругих деформаций жидкости и металлоконструкций пресса, накопленной во время рабочего хода, в энергию жидкости высокого давления, возвращаемой в напорную гидролинию пресса (пат. 2528282 RU):

1 — рабочий гидроцилиндр; *2*, *3* — возвратные гидроцилиндры; *4* — клапанный гидрораспределитель рабочего гидроцилиндра; *5* — клапанный гидрораспределитель возвратных гидроцилиндров; *6* — бак наполнения; *7* — напорная гидролиния; *8* — насосно-аккумуляторная станция; *9* — сливная гидролиния; *10* — гидробак, находящийся под атмосферным давлением; *11* — устройство преобразования энергии; *12* — подвижная траверса; *13*, *14* — соответственно напорный и наполнительно-сливной клапаны рабочего гидроцилиндра; *15* — наполнительно-сливная гидролиния; *16*, *17* — соответственно напорный и сливной клапаны возвратных гидроцилиндров; *18* — датчик давления; *19* — приемный гидроцилиндр; *20*, *21*, *22* — выходные гидроцилиндры; *23* — разделительный элемент; *24*, *25* — управляемые клапаны; *26*, *27*, *28* — обратные клапаны; *29*, *30*, *31* — клапаны с гидравлическим управлением

гию давления жидкости, сжимаемой в рабочих полостях возвратных гидроцилиндров);

б) при подаче жидкости высокого давления в рабочие полости рабочих гидроцилиндров при неоткрытых проходных сечениях рабочих окон сливного и напорного клапанов возвратных гидроцилиндров (и возникновении эффекта мультипликации давления);

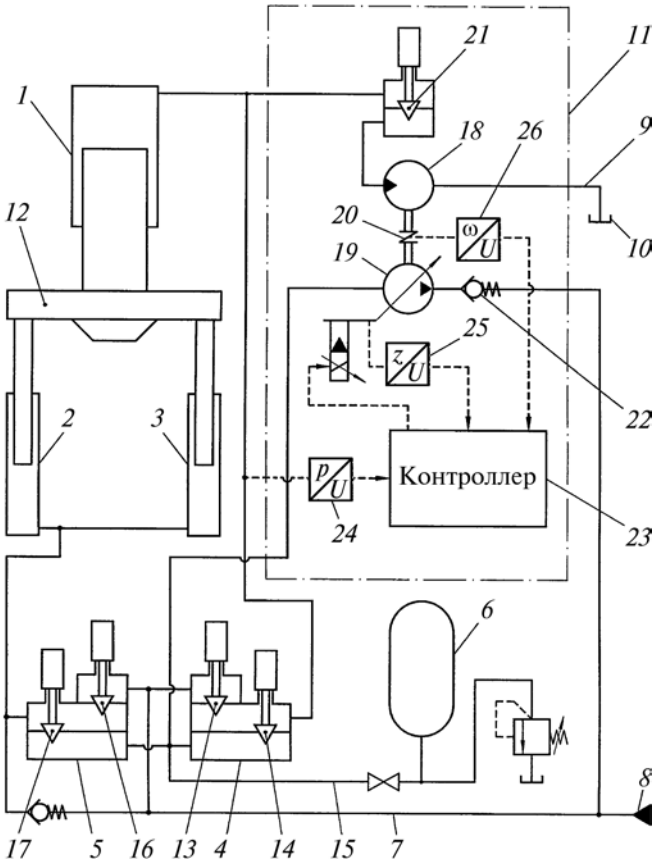


Рис. 5. Упрощенная схема гидропривода с устройством преобразования потенциальной энергии упругих деформаций жидкости и металлоконструкций пресса, накопленной во время рабочего хода, в энергию жидкости высокого давления, возвращаемой в напорную гидролинию пресса (пат. 2515779 RU):

1 — рабочий гидроцилиндр; *2*, *3* — возвратные гидроцилиндры; *4* — клапанный гидрораспределитель рабочего гидроцилиндра; *5* — клапанный гидрораспределитель возвратных гидроцилиндров; *6* — бак наполнения; *7* — напорная гидролиния; *8* — насосно-аккумуляторная станция; *9* — сливная гидролиния; *10* — гидробак, находящийся под атмосферным давлением; *11* — устройство преобразования энергии; *12* — подвижная траверса; *13*, *14* — соответственно напорный и наполнительно-сливной клапаны рабочего гидроцилиндра;*15* — наполнительно-сливная гидролиния; *16*, *17* — соответственно напорный и сливной клапаны возвратных гидроцилиндров; *18* — гидромотор; *19* — насос с пропорциональным электрическим управлением; *20* — соединительная муфта валов гидромотора и насоса; *21* — управляемый клапан; *22* — обратный клапан; *23* — контроллер; *24* — датчик давления; *25* — датчик положения регулирующего органа насоса; *26* — датчик угловой скорости вращения валов гидромотора *18* и насоса *19*

в) при практически мгновенном снижении (исчезновении) рабочей нагрузки (силы сопротивления), преодолеваемой прессом в процессе его рабочего хода.

Поскольку при возникновении перегрузки по давлению перетекание жидкости из рабочих полостей возвратных гидроцилиндров в напорную гидролинию пресса через обратный клапан происходит практически без потерь давления и, соответственно, энергии, то рассматриваемое техническое решение выгодно отличается от стандартного способа ограничения максимального давления в каком-либо месте гидросистемы с помощью присоединенного к этому месту своим входным (напорным) каналом предохранительного клапана соответствующей пропускной способности, выходной (сливной) канал которого соединяется с гидробаком, находящимся под атмосферным давлением.

Однако при падении (по какой-либо причине) давления в напорной гидролинии, от которой происходит питание пресса жидкостью высокого давления, и, соответственно, в напорной гидролинии пресса ниже некоторого порогового значения указанный выше обратный клапан не предотвращает вытеснение жидкости из рабочих полостей возвратных гидроцилиндров под действием силы давления, действующей на траверсу со стороны рабочих гидроцилиндров, в случае горизонтальных прессов и дополнительно силы веса подвижной траверсы и движущихся вместе с ней частей в случае вертикальных прессов. В результате, если траверса не находится на жестком упоре в данном случае происходит ее самопроизвольное перемещение, что может повлечь за собой поломку оборудования (например, инструмента) и возникновение опасности для обслуживающего персонала.

Исключение самопроизвольного перемещения подвижной траверсы пресса при чрезмерном падении давления в его напорной гидролинии и гарантированное ограничение максимального давления в рабочих полостях возвратных гидроцилиндров при минимальном усложнении конструкции гидравлического привода достигается при использовании вместо обратного клапана клапана давления, полость управления которого соединена с выходным каналом логического клапана "ИЛИ", один вход которого соединен с выходным каналом указанного клапана давления, а другой вход — с напорным каналом предохранительного клапана и посредством дросселя с входным каналом клапана давления (рис. 6).

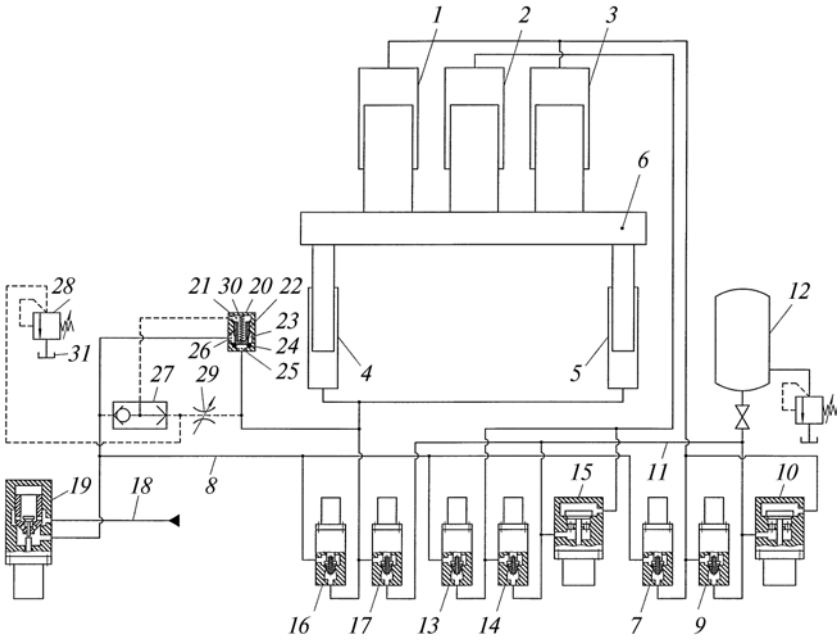


Рис. 6. Упрощенная схема гидропривода пресса с устройством защиты возвратных гидроцилиндров от перегрузки (пат. 2468919 RU):

1, *2*, *3* — рабочие гидроцилиндры; *4*, *5* — возвратные гидроцилиндры; *6* — подвижная траверса; *7*, *9*, *10* — соответственно напорный, сливной и наполнительный клапаны боковых рабочих гидроцилиндров *1* и *3*; *8*, *11* — соответственно напорная и наполнительно-сливная гидролинии пресса; *12* — бак наполнения; *13*, *14*, *15* — соответственно напорный, сливной и наполнительный клапаны центрального рабочего гидроцилиндра *2*; *16*, *17* — соответственно напорный и сливной клапаны возвратных гидроцилиндров; *18* — напорная гидролиния насосно-аккумуляторной станции; *19* — автоматический запорный клапан; *20* — перепускной клапан; *21*, *25*, *26* — соответственно полость управления, входной и выходной каналы клапана *20*; *22*, *23*, *24*, *30* — соответственно корпус, запорный элемент, седло и пружина клапана *20*; *27* — логический клапан "ИЛИ"; *28* — предохранительный клапан; *29* — регулируемый дроссель; *31* — гидробак, находящийся под атмосферным давлением

При работе многих прессов происходит внезапное снижение рабочей нагрузки. Для ковочных и штамповочного прессов данное явление наблюдается при прошивке отверстий в поковках (и особенно в "подстывших" поковках). Прессы для холодной ломки стальных и чугунных заготовок, пресс-ножницы для холодной резки металлического лома, прессы для обрезки облоя у штампованных заготовок испытывают последствия внезапного исчезновения рабочей нагрузки практически при каждом рабочем ходе.

Работа пресса при внезапном снижении нагрузки сопровождается резким рывком под-

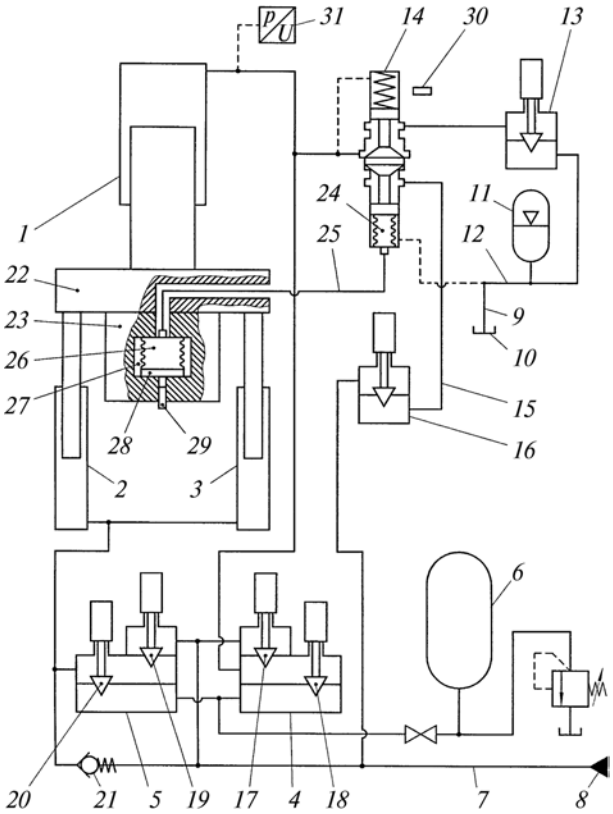


Рис. 7. Упрощенная схема гидропривода пресса с устройством автоматической разгрузки рабочего гидроцилиндра от давления при внезапном исчезновении нагрузки во время рабочего хода (пат. 2530917 RU):

1 — рабочий гидроцилиндр; *2*, *3* — возвратные гидроцилиндры; *4* — клапанный гидрораспределитель рабочего гидроцилиндра; *5* — клапанный гидрораспределитель возвратных гидроцилиндров; *6* — бак наполнения; *7* — напорная гидролиния; *8* — насосно-аккумуляторная станция; *9* — сливная гидролиния; *10* — гидробак, находящийся под атмосферным давлением; *11* — пневмогидравлический аккумулятор; *12* — гидролиния низкого давления; *13* — управляемый клапан; *14* — трехлинейный двухпозиционный гидрораспределитель; *15* — гидролиния подвода высокого давления;*16* — дополнительный напорный клапан; *17*, *18* — соответственно напорный и наполнительно-сливной клапаны рабочего гидроцилиндра; *19*, *20* — соответственно напорный и сливной клапаны возвратных гидроцилиндров; *21* — обратный клапан; *22* — подвижная траверса; *23* — штамповая оснастка; *24*, *26* — сильфонные резервуары; *25* — рукав высокого давления; *27* — полость; *28* — толкатель; *29* — съемный хвостовик толкателя; *30* — концевой выключатель; *31* — датчик давления

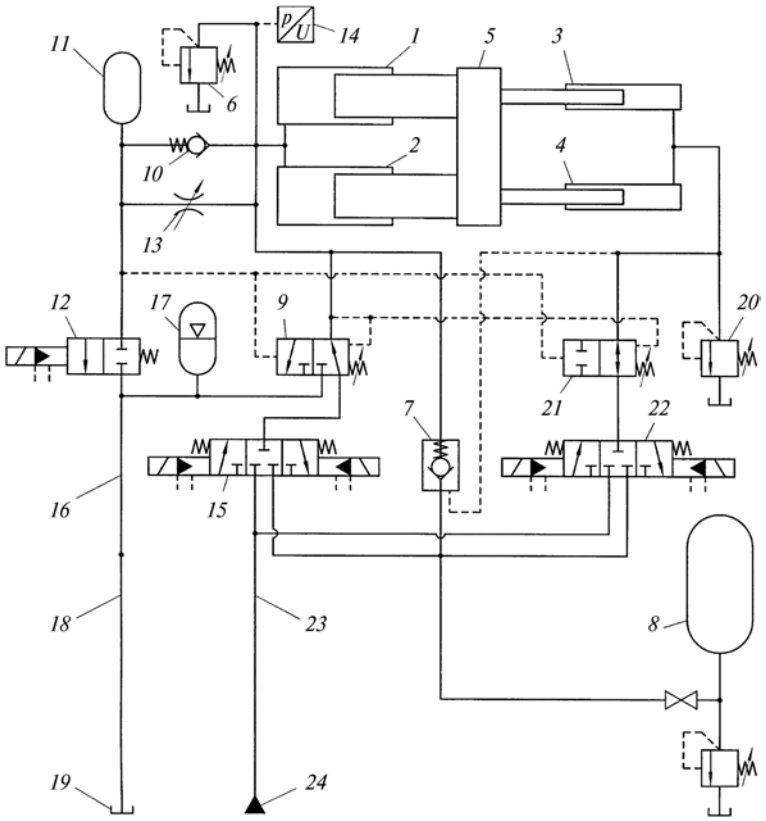


Рис. 8. Принципиальная схема гидропривода с устройством автоматической разгрузки рабочих гидроцилиндров от давления при внезапном исчезновении нагрузки во время рабочего хода (пат. 2536734RU):

1, *2* — рабочие гидроцилиндры; *3*, *4* — возвратные гидроцилиндры; *5* — подвижная траверса; *6*, *20* — предохранительные клапаны; *7* — клапан наполнения; *8* — бак наполнения; *9*, *21* — гидрораспределители с гидравлическим управлением; *10* — обратный клапан; *11* — упругая емкость; *12* — гидрораспределитель разгрузки; *13* — регулируемый дроссель; *14* — датчик давления; *15* — гидрораспределитель рабочих гидроцилиндров; *16* — гидролиния низкого давления; *17* — пневмогидравлический аккумулятор; *18* — сливная гидролиния; *19* — гидробак, находящийся под атмосферным давлением; *22* — гидрораспределитель возвратных гидроцилиндров; *23* — напорная гидролиния; *24* — насосная установка

вижных (а при определенных условиях и неподвижных) частей пресса, что отрицательно сказывается на их долговечности и долговечности элементов гидросистемы пресса.

Увеличить срок службы металлоконструкций и элементов гидросистемы пресса можно путем уменьшения уровня и продолжительности действия динамических нагрузок, воспринимаемых ими при внезапном снижении (исчезновении) рабочей нагрузки, за счет форсирования в указанном случае процесса снижения давления в полостях рабочих гидроцилиндров. Такое форсирование достигается при автоматическом соединении полостей рабочих гидроцилиндров пресса при исчезновении рабочей нагрузки с жидкостной полостью пневмогидравлического аккумулятора, постоянно соединенной с гидролинией низкого давления (в частности, со сливной гидролинией). Исчезновение рабочей нагрузки оперативно может идентифицироваться непосредственно благодаря контролю ее величины (рис. 7) и по началу снижения давления в полостях рабочих гидроцилиндров (рис. 8).

Заключение. Совершенствование гидроприводов прессов направлено на снижение потерь энергии и динамики работы, повышение безопасности и долговечности.

Улучшение характеристик работы гидроприводов прессов осуществляется путем изменения применяемых схемных решений и изменения конструкции отдельных гидравлических устройств, входящих в состав гидропривода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Гойдо М.Е.** Снижение потерь энергии при работе насосно-аккумуляторного гидропривода // Справочник. Инженерный журнал. 2010. № 10. С. 45—49.

2. **Снижение** колебаний давления в наполнительно-сливном трубопроводе гидросистемы ковочного пресса / М.Е. Гойдо, В.В. Бодров, Р.М. Багаутдинов, М.А. Алексеев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2005. № 4. С. 30—36.

Максим Ефимович Гойдо, канд. техн. наук,
goido@cheltec.ru;
Валерий Владимирович Бодров, канд. техн. наук;
Рамиль Мерсеитович Багаутдинов

УДК 621.77.07

О.Н. Комаров, И.Г. Сапченко, С.Г. Жилин
(Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения РАН, г. Комсомольск-на-Амуре)

Технологические особенности процессов прессования термитной смеси для экзотермического переплава*

Для организации процесса переработки отходов машиностроительных и металлургических предприятий предложена их переработка путем экзотермического переплава непрерывного прессованного из термитной смеси стержня, подаваемого в предварительно подготовленный расплав стали, что обеспечивает эффективность и контролируемость процесса. Проведен теоретический и экспериментальный анализ технологических схем и устройств реализации такого процесса. Установлено, что экзотермический переплав уплотненной термитной смеси в виде непрерывного стержня обеспечивает увеличение массового выхода металла при сокращении восстановителя в шихте.

Ключевые слова: переработка отходов металлургических и машиностроительных предприятий; термитная реакция; непрерывный процесс восстановления металла; прессование; валковое устройство.

The process of recycling of wastes from the metallurgical and mechanical engineering industry by exothermic remelting of continuous rod made of thermite charge is presented. This rod is supplied into the preliminarily prepared steel melt. This provides the efficiency and controllability of the process. The theoretical and experimental analysis of manufacturing schemes and equipment for implementation of such process is performed. It is founded that exothermic remelting of compressed thermite charge in the form of continuous rod provides increment in metal extraction with diminishing deoxidizer in charge.

Keywords: recycling of wastes from metallurgical and mechanical engineering industry; thermit reaction; continuous process of metal reduction; pressing; rolling device.

Повышение конкурентоспособности предприятий машиностроения и металлургии обеспечивается рациональным использованием вторичных ресурсов. Существенной проблемой в данном случае является низкий объем утилизации и переработки *отходов машиностроительных и металлургических предприятий* (ОММП), к которым относят: окалину, стружку черных и цветных металлов.

В процессе производства используются только 10...15 % ОММП. Полигоны для захоронения ОММП занимают значительные земельные площади, приводят к загрязнению окружающей среды. Переплав мелкой стружки черных и цветных металлов затруднителен вследствие высокой доли угара, что делает этот процесс экономически малоэффективным. Окалину частично применяют в металлургических процессах для обезуглероживания стали.

Таким образом, разработка эффективных технологий получения металлопродукции из ОММП позволит повысить конкурентоспособность предприятий в результате снижения затрат на закупку и транспортировку шихтовых материалов.

Перспективным представляется технологическое направление, позволяющее сократить долю металла, получаемого традиционным переплавом лома в общем объеме литой металлопродукции за счет использования процесса восстановления железа из ОММП экзотерми-

* Работа выполнена при поддержке гранта ДВО РАН 12-I-П26-02 "Экзотермические реакции в твердотельных смесях в качестве основных созидательных технологий утилизации техногенных образований" и гранта Регионального общественного Фонда содействия отечественной науке "Разработка технологии получения высокопрочной низкоуглеродистой стали из алюмотермитной шихты".

ческим переплавом (см. кн.: Новохацкий В.А., Жуков А.А., Макарычев Ю.И. Малоотходная технология производства стальных отливок с экзотермическими прибылями. М.: Машиностроение, 1986. 64 с.). При этом предпочтительным является получение из ОММП сортовых марок сталей (например: 45Л, 35ХГСЛ, 110Г13Л и др.). Для получения расплава металла таким способом не требуется внешний подвод тепла к шихте (как это происходит в печах сопротивления, индукционных и т.д.). Тепло, необходимое для расплавления шихты, образуется при прохождении экзотермической реакции восстановления железа в термитной шихте.

Исходной термитной шихтой служит смесь стружки алюминия и окалины, наполнители — стальная и чугунная стружка, используемые для увеличения массового выхода образуемого в результате восстановления металла. Наполнителями могут быть различные ферросплавы и модификаторы для получения стали необходимого химического состава. Стальная и чугунная стружка также влияют на химический состав получаемого металла, так как содержат комплекс химических элементов и позволяют сократить использование ряда дорогостоящих модификаторов.

Однако переработка ОММП экзотермическим переплавом обусловлена низким массовым выходом расплавленного металла (около 49 % от термитной шихты) и, как следствие, высоким содержанием в термитной шихте восстановителя (до 25 %).

Кроме того, экзотермический переплав ОММП в больших объемах, обеспечивающих технологически целесообразное количество расплава для получения литого металлоизделия, например массой более 5 кг, сопровождается бурным кипением, взрывами и разбрызгиванием продуктов окислительно-восстановительной реакции, представляет опасность и нарушение норм охраны труда.

Установлено, что варьированием величиной уплотнения термитной шихты достигается изменение соотношения образуемых фаз при ее горении [1, 2], а именно: газа, металла и шлака. Низкая плотность шихты способствует увеличению объема образования газовой и шлаковой фаз алюмотермитного переплава. Повышение плотности термитной шихты снижает объем образующихся газов и обеспечивает более спокойное прохождение химикотермических процессов экзотермического переплава ОММП.

Наибольший массовый выход металла (до 53 %) при "сжигании" термита без технологических добавок достигается при плотности упаковки смеси 3,5 г/см^3, что свидетельствует о благоприятном влиянии увеличения площади контактного взаимодействия компонентов шихты на эффективность экзотермического процесса получения расплава. Это обеспечивает равномерное распределение химических элементов в структуре металлоизделия. Количество образованного металла может быть увеличено введением в шихту стального лома (выход увеличивается до 75 %) [2].

Таким образом, установлено, что на массовый выход и качество получаемого металла влияет плотность термитной шихты перед началом реакции. Обеспечение получения больших объемов металла возможно введением уплотненной термитной шихты в предварительно подготовленный расплав. В данном случае введение термитной шихты целесообразно в виде прессованных конгломератов или непрерывного стержня. В противном случае россыпь термитной шихты сгорит в окислительной атмосфере на поверхности шлаковой фазы продуктов экзотермической реакции и ожидаемого эффекта не принесет.

Обеспечить сокращение восстановителя в шихте также возможно непрерывностью экзотермического процесса. Установившийся высокотемпературный режим (~2700 °С) в уплотненной термитной шихте будет способствовать процессу естественного разложения оксидов металлов и сокращению участия в реакциях восстановления активных элементов.

На основании изложенного выше очевидно, что разработка технологии и оборудования, позволяющего эффективно в непрерывном режиме осуществить подачу уплотненного термитного материала в зону расплава является актуальной задачей.

Эффективность процесса, определяемая массовым выходом металла, может быть достигнута непрерывной подачей в зону реакции прессованного термитного стержня цилиндрической формы. При этом в результате уплотнения реализуется процесс непрерывного обжатия алюмотермитной композиции валками, что обеспечивает увеличение площади контактного взаимодействия компонентов смеси и, как следствие, наибольшую эффективность процесса.

Работа направлена на исследование особенностей уплотнения термитной смеси прессованием для получения цилиндрического

стержня из дисперсного термитного материала во встречновращающихся валках [3]. При этом задачи повышения интенсивности процесса получения расплава и увеличения его массового выхода решали обеспечением увеличения площади контактного взаимодействия компонентов термитной шихты, достигаемого прессованием.

Расчетами определяли параметры обжатия порошка при формировании термитного стержня: центральные углы подачи материала, прокатки, спрессовывания; нейтральный угол; угол упругого сжатия валков и угол стабилизации процесса прокатки, определяющие положение поперечных сечений очага деформации, под которым понимают объем материала, расположенный между прокатными валками и боковыми стенками устройства, подающего материал (рис. 1).

Для получения термитных стержней при проведении расчетов режимов прокатки порошков использовали композицию: 25 % восстановителя и 75 % окислителя (по массе), с насыпной плотностью 1930 кг/м^3 и содержанием добавок 50 %. Фракционный состав компонентов без предварительной подготовки, обусловливался особенностью прохождения и составил $\geqslant$ 0,4 мм.

Ранее установлено, что предпочтительными свойствами обладают смеси с содержанием добавок в количестве 50 % [2]. При этом достигается максимальный выход термитного металла, газовые раковины на поверхности слитка отсутствуют.

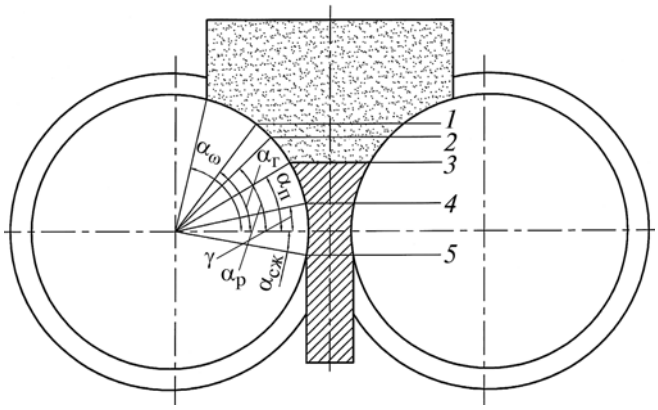


Рис. 1. Угловые параметры процесса прокатки термитного порошка во встречновращающихся валках:

1 — граница регулирующего действия шибера; *2* — сечение, соответствующее началу уплотнения порошка; *3* — сечение, соответствующее образованию жесткого клина; *4* — нейтральное сечение; *5* — сечение выхода заготовки из валков; α_ω — угол подачи порошка; $\alpha_г$ — граничный угол подачи порошка; $\alpha_р$ — угол прокатки; $\alpha_п$ — угол спрессовывания; γ — нейтральный угол; $\alpha_{сж}$ — угол упругого сжатия валков

Данная смесь обладает небольшим углом прокатки и невысокой насыпной плотностью, что определяет возможность уплотнения материала до необходимых параметров.

Скорость подачи термитного стержня в зону реакции определяется скоростью горения (растворения, разложения или восстановления компонентов в ванне жидкого металла) и не зависит от его диаметра, устанавливается частотой вращения валков. Диапазон частот вращения валков является одной из важнейших характеристик при проектировании соответствующего оборудования. Нарушение баланса скоростей приводит к изменению теплового режима процесса, влияющего на стабильность реакции и получение расплава необходимого качества. Скорость горения термитного стержня (растворения, разложения или восстановления компонентов в ванне жидкого металла) зависит от вида и соотношения элементов, входящих в исходную композицию, степени их уплотнения и фракционного состава. Определено [2], что значения скоростей горения термитных составов, используемые в расчетах, в зависимости от степени уплотнения составляют 1,4...5,5 г/(см$^2\cdot$с).

Используя методику расчета (см. кн.: Кипарисов С.С., Либенсон Г.А. Порошковая металлургия. 3-е изд. перераб. М.: Металлургия, 1991. 432 с.) прокатки металлических порошков, проведены ориентировочный расчет узлов установки и оценка плотностей получаемых термитных смесей. Недостатком методики является то, что некоторые параметры (угол прокатки, коэффициент вытяжки) определяют экспериментально. Сложность расчета диаметра валков в данном случае обусловлена большим диапазоном гранулометрического состава компонентов термитной шихты. Для формирования прессовки с равномерными свойствами и удобства расчета был выбран диаметр термитного стержня 0,04 м.

Расчетами установлены угловые параметры прокатки термитных композиций с количеством добавок 50 %, предназначенных для получения металла с химическим составом, соответствующим стали 45Л, а именно: угол подачи порошка $\alpha_ш$ = 70°; граничный угол подачи порошка $\alpha_г$ = 50; угол прокатки $\alpha_р$ = 28,358; угол спрессовывания $\alpha_п$ = 3...6° (определяют экспериментально; зависит от фракции и формы частиц компонентов смеси); нейтральный угол γ принят равным 1; угол упругого сжатия валков $\alpha_{сж} \approx 0{,}2$.

Для получения прессовки цилиндрического сечения диаметром 0,04 м минимальный диаметр валка должен составлять 1,36 м. Это значит, что минимальный габаритный размер установки в зоне валков 2,72 м. Диаметры валков, которыми должна обладать установка для получения термитных стержней с указанными плотностями: для плотности смеси 3850 кг/м^3 — 3,5 м; 4000 кг/м^3 — 4 м; 4120 кг/м^3 — 5 м. Таким образом, установлена прямая взаимосвязь между диаметром прессующих валков и диаметром проката, т.е. чем меньше диаметр проката, тем меньше диаметр прокатных валков.

Для большинства термитных смесей, имеющих невысокую насыпную плотность, соотношение диаметров валков к диаметру выходного сечения стержня должно быть больше 1/30. Применение устройств такого типа в промышленности для обеспечения высокой эффективности и производительности требует получения термитного стержня значительно большего диаметра, а значит и больших габаритных размеров установок.

В качестве альтернативного варианта для получения термитного стержня с необходимыми прочностными свойствами при прокатке исходной экзотермической композиции в валках диаметром 300 мм и диаметром ручья 10 мм предложено использовать непрерывный сердечник (центральный стержень) (рис. 2), который будет компенсировать нехватку термитного материала в очаге деформации. Такой метод формирования стержня показал возможность прессования термитных смесей с низкой насыпной плотностью.

На основе расчетов была изготовлена экспериментальная установка для прессования термитных стержней (рис. 3). Установка ориентирована в пространстве таким образом, чтобы прессованный стержень на выходе из установки погружался в реактор с требуемой скоростью, обеспечивающей полноту прохождения окислительно-восстановительного процесса.

Экспериментальная установка имеет габаритные размеры: высота 1,8 м; длина 3 м; ширина 2 м; масса 2700 кг. Производительность в зависимости от состава смеси от 7 до 130 кг/ч прессованного стержня. Диаметр проката 10...40 мм. Вращающий момент на прокатных валках достигает 40 кН·м, частота вращения прокатных валков 0,46 об/мин. Установленные на машине валки (диаметром 300 мм) позволяют эффективно прессовать термитные смеси с невысокой насыпной плотностью и малой уплотняемостью.

Для исследования процесса деформации термитных композиций в качестве сердечника

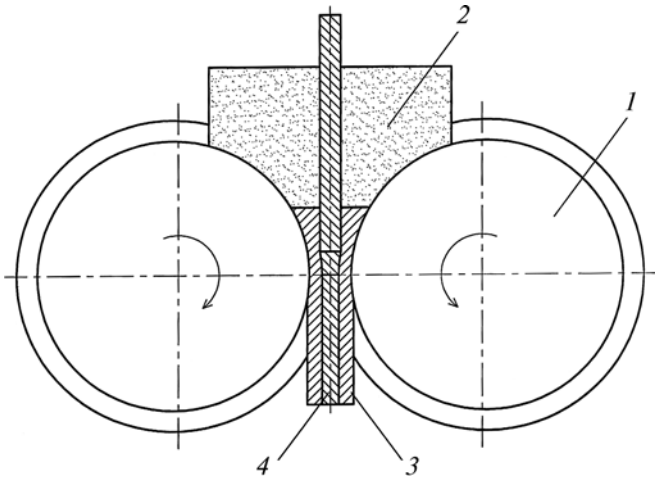


Рис. 2. Схема получения термитного стержня из порошка во встречновращающихся валках с использованием сердечника:

1 — валок; *2* — термитный порошок; *3* — термитный стержень; *4* — стальной сердечник

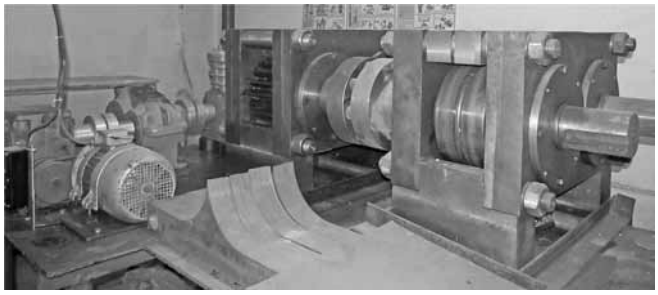


Рис. 3. Экспериментальная установка для непрерывного получения термитных стержней со стальным сердечником методом прокатки в непрерывном режиме

использовали стальные прутки длиной 200 мм и диаметрами 4; 6,5 и 8 мм. После прокатки длина прутков составила 211; 257 и 290 мм соответственно. При этом диаметр сечения первого прутка 3,9 мм. Сечения других прутков имели форму эллипса с размерами 5 и 5,3 мм в одной плоскости, 6,6 и 9,1 мм — в другой соответственно (рис. 4). Плотность термитной смеси, напрессованной на стальные прутки, в среднем составила 3850; 4000 и 4120 кг/м^3 соответственно.

Коэффициенты вытяжки сердечников имеют следующие значения: для диаметра 4 мм — 1,052; для диаметра 6,5 мм — 1,285; для диаметра 8 мм — 1,45.

Согласно рис. 4 максимальная сжимающая сила возникает в радиальном направлении плоскости симметрии вращения валков. Термитная смесь первоначально уплотняется в этой плоскости ручья с дальнейшим перераспределением смеси к зоне сопряжения валков, выравнивая плотность прессовки. Во всех рассмотренных случаях прессования массовое соотношение сердечников и термитной шихты соответствовало ~50/50. Это

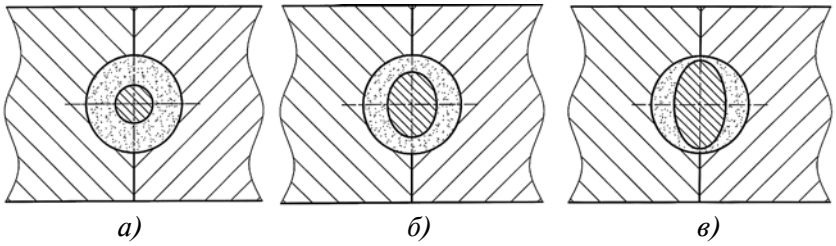


Рис. 4. Формы сердечников после деформации исходного прутка диаметром: *а* — 4 мм; *б* — 6,5 мм; *в* — 8 мм

позволяет использовать стальной непрерывный сердечник вместо технологической добавки без ущерба для прохождения экзотермического процесса и качества получаемого металла.

Установлено, что в получаемом металле находится высокое содержание восстановителя — Al. Это свидетельствует о том, что восстановитель не в полном объеме вступает в реакцию с окислителем — окалиной. Окалина, как было предположено ранее, частично разлагается на составляющие вследствие образующегося избыточного тепла экзотермической реакции. Проходящие при этом реакции описываются следующими формулами:

$$Fe_2O_3 + 2Al = Al_2O_3 + 2Fe + Q_{p1}$$

$$3FeO + 2Al = Al_2O_3 + 3Fe + Q_{p2}$$

$$2Fe_2O_3 = 4Fe + 3O_2 - Q_{p1}$$

(при температуре 1565 °С) 882,2 кДж/моль;

$$2FeO = 2Fe + O_2 - Q_{p2}$$

(при температуре 1360 °С) 264,8 кДж/моль.

При непрерывной подаче термитного стержня в ванну с расплавом происходит его нагрев и продвижение теплового фронта от зоны реакции вдоль стержня. Восстановитель, имеющий низкую температуру плавления, расплавляется и посредством действия капиллярных сил равномерно распределяется в порах стержня, обеспечивая максимальную площадь контакта с окислителем и, как следствие, стабильность и полноту прохождения реакции.

Таким образом, при установившихся режимах восстановительных процессов при непрерывной подаче уплотненного термитного материала в зону реакции в расплавленный металл возможно изменение соотношения компонентов композиций в сторону снижения восстановителя. В частности, при использовании в качестве восстановителя технически чистого алюминиевого сплава, его содержание может быть уменьшено до 15 %.

На основании установленной целесообразности организации процесса переработки ОММП в виде непрерывного прессованного из термитной смеси стержня, подаваемого в предварительно подготовленный расплав стали, в целях обеспечения его эффективности и контролируемости (безопасности), проведен теоретический и экспериментальный анализ технологических схем и устройств реализации последнего.

Установлено, что экзотермический переплав уплотненной термитной смеси в виде непрерывного стержня обеспечивает достижение поставленной цели, а именно, увеличение массового выхода металла при сокращении восстановителя в шихте тем больше, чем выше плотность последней.

Теоретически определено, что для достижения предпочтительной плотности и диаметра сечения непрерывного стержня из термитной смеси габаритные размеры прессующих устройств достигают сложнореализуемых значений при их изготовлении. Альтернативным вариантом решения изложенной выше проблемы может стать технологическая схема использования при формировании непрерывного термитного стержня стального сердечника, выступающего в роли наполнителя термитной шихты. При этом независимо от диаметра стального сердечника и размеров ручья прессовых валков устройства соотношение площадей сечения термитной смеси и сердечника в стержне ~50/50, что обеспечивает стабильность прохождения экзотермического процесса переработки ОММП, его контролируемость, максимальный массовый выход стали при минимальном расходе восстановителя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Особенности** получения литья из термитных сталей / И.Г. Сапченко, С.Г. Жилин, О.Н. Комаров, В.В. Предеин // Заготовительные производства в машиностроении. 2008. № 8. С. 3—6.

2. **Сапченко И.Г., Комаров О.Н., Жилин С.Г.** Влияние состава термитной смеси и ее температуры на объем восстанавливаемой стали марки Ст45Л // Литье и металлургия. 2007. № 1. С. 115—117.

3. **Способ** получения стали и устройство для его реализации / И.Г. Сапченко, С.Г. Жилин, О.Н. Комаров: пат. № 2366722 РФ; опубл. 10.09.2009, Бюл. № 25.

Олег Николаевич Комаров, канд. техн. наук;
Игорь Георгиевич Сапченко, д-р техн. наук;
Сергей Геннадьевич Жилин, канд. техн. наук,
zhilin@imim.ru

УДК 621.791.722:621.762.04

А.И. Рудской, С.Ю. Кондратьев *(Санкт-Петербургский государственный политехнический университет),*
Ю.А. Соколов, В.Н. Копаев *(ООО "НТК Электромеханика", г. Ржев)*

Математическая модель процесса получения металлических гранул методом вращающегося электрода с плазменным нагревом

Построена математическая модель процесса получения металлических гранул на специализированной технологической установке. Процесс использует метод распыления вращающегося электрода с плазменным нагревом. Модель включает в себя все технологические операции. Показано, что численное моделирование процесса охлаждения частиц распыленного металла в газовой среде позволяет прогнозировать важнейшие параметры процесса и выбирать наиболее выгодные значения параметров оборудования.

Ключевые слова: композиционные материалы; порошковая металлургия; электронно-лучевой синтез; математическое моделирование; металлические гранулы.

The mathematical model of producing process of metal granules by specialized technological installation is constructed. Process uses method of dispersion of the rotating electrode with plasma heating. The model includes all technological operations. It is shown that numerical modeling of cooling process of particles of the sprayed metal in the gas environment allows to predict the most important parameters of process and to choose the most favorable values of parameters of the equipment.

Keywords: composite materials; powder metallurgy; electron beam synthesis; mathematical modeling; metal granules.

Среди многих известных технологий получения порошковых деталей [1, 2] к наиболее перспективным относится технология *синтеза изделий электронным лучом* (СИЭЛ) [3—5], позволяющая также формировать на поверхности покрытия с повышенными эксплуатационными свойствами [6, 7]. Эти методы открывают новые возможности по получению изделий из порошка различного химического состава с программируемой структурой. Важной технологической операцией в них является процесс получения гранул требуемых размеров, формы и химического состава [8].

Целью работы является построение математической модели процесса получения гранул на специализированной технологической установке, оснащенной камерой распыления, механизмом вращения электрода, узлом подачи газовой смеси, источником плазменного нагрева, системой водяного охлаждения стенок камеры. Использован метод вращающегося электрода с плазменным нагревом (PREP), при котором вращающийся электрод подается в камеру распыления, где в результате оплавления плазменной дугой на торце электрода образуется жидкая пленка металла.

Условия построения модели. Механизм каплеобразования в методе PREP включает в себя: формирование тонкой пленки расплавленного металла размером 20...50 мкм на торце электрода вследствие воздействия плазмы, движение жидкого металла к периферийной области электрода и образование венца, перетекание расплава в сформировавшиеся на венце сферические головки, отрыв частиц от венца при превышении сил центробежного ускорения по сравнению с силами поверхностного натяжения.

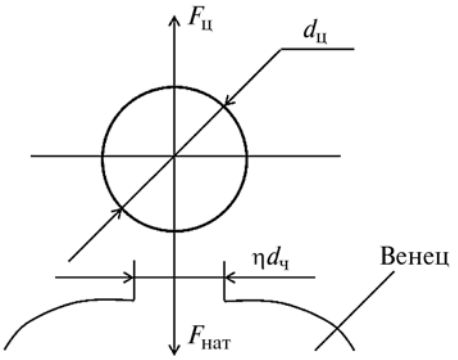


Рис. 1. Схема образования частицы в методе PREP

В таком механизме на первом этапе (до момента отделения частицы от венца) практически отсутствует ее взаимодействие с газовой средой. Следовательно, исключается получение частиц с газовыми и прочими включениями. Охлаждение и кристаллизация в смеси инертных газов происходят на втором этапе. При скоростях кристаллизации свыше $10^3...10^4$ °С/с образуются частицы с мелкозернистой структурой, а при переходе к более высоким скоростям охлаждения размеры элементов микроструктуры уменьшаются.

При отрыве частицы от венца на нее действуют две силы: удерживающая сила натяжения $F_{нат}$ на перемычке размером $\eta d_ч$ (коэффициент перемычки η = 0,8...1,0; $d_ч$ — диаметр частицы) и отрывающая центробежная сила $F_ц$ (рис. 1). Массу частицы, оторвавшейся от венца, можно определить по следующей формуле:

$$m_ч = \pi\rho_ч d_ч^3/6, \quad (1)$$

где $\rho_ч$ — плотность частицы.

Для отрыва частицы необходимо выполнение условия:

$$F_ц \geqslant F_{нат}. \quad (2)$$

Определим силу натяжения:

$$F_{нат} = \sigma(T)\pi\eta d_ч, \quad (3)$$

где $\sigma(T)$ — коэффициент поверхностного натяжения расплава.

Коэффициент поверхностного натяжения частицы $\sigma(T)$ равен работе, необходимой для увеличения поверхности жидкости на единицу площади при постоянной температуре. Коэффициент $\sigma(T)$ зависит от свойств расплава и охлаждаемой среды. При моделировании желательно учитывать зависимость σ от температуры, которую можно определить по формуле [9]

$$d\sigma/dT = -B(\rho/\mu_м)^{2/3}, \quad (4)$$

где T — температура;

$\mu_м$ — молекулярная масса;

B — постоянная, B = 2,1 г·см^2/(с·°С).

Сила центробежного ускорения:

$$F_ц = m_ч a_ц, \quad (5)$$

где $a_ц$ — центробежное ускорение:

$$a_ц = v_з^2/R_з = 2v_з^2/D_з, \quad (6)$$

где $R_з$, $D_з$ — радиус и диаметр заготовки соответственно; $v_з$ — линейная скорость вращающейся заготовки.

Линейная скорость вращения заготовки связана с угловой следующей зависимостью:

$$v_з = R_з\omega, \quad (7)$$

где ω — угловая скорость.

После ряда подстановок имеем:

$$F_ц = \pi\rho_ч d_ч^3 R_з\omega^2/6. \quad (8)$$

Условие отрыва частицы можно представить в следующем виде:

$$\pi\rho_ч d_ч^3 R_з\omega^2/6 \geqslant \sigma\pi\eta d_ч \quad (9)$$

или

$$\omega^2 \geqslant 6\sigma\eta/\left(\rho_ч d_ч^2 R_з\right). \quad (10)$$

Отсюда

$$\omega \geqslant \left(\frac{6\sigma\eta}{\rho_ч R_з}\right)^{0,5} \Big/ d_ч. \quad (11)$$

Для получения частиц диаметром $d_ч$ необходима частота вращения заготовки n, удовлетворяющая следующему неравенству:

$$n \geqslant 23,39\left(\frac{\sigma\eta}{\rho_ч R_з}\right)^{0,5} \Big/ d_ч. \quad (12)$$

Таким образом, при заданной частоте вращения заготовки можно прогнозировать диаметр получаемых частиц:

$$d_ч \geqslant 23,39\left(\frac{\sigma\eta}{\rho_ч R_з}\right)^{0,5} \Big/ n. \quad (13)$$

Полученные формулы (12) и (13) позволяют в зависимости от подхода определить частоту вращения заготовки при заданном диаметре или, наоборот, прогнозировать диаметр частиц при заданной частоте вращения заготовки.

Отвод тепла с поверхности летящей частицы в вакуумном пространстве осуществляется излучением, длина полета частицы при этом не зависит от ее размера и может составлять несколько метров. Более интенсивная теплопередача происходит при дополнительном конвективном охлаждении капли в потоке смеси инертных газов (аргон и гелий). В этом случае длина полета частицы, регулируемая расходом инертного газа и расположением распределителя охлаждающего газа в плавильной камере, существенно уменьшается.

В процессе охлаждения частицы теплопередача путем принудительной конвекции примерно на два порядка превосходит потери тепла вследствие излучения. Важнейшими параметрами, влияющими на скорость охлаждения частицы, являются диаметр частицы, теплопроводность газа, разность температур между частицей и газом.

Средний по поверхности коэффициент теплоотдачи α от шара, обтекаемого потоком теплоносителя, можно рассчитать по формуле:

$$\mathrm{Nu} = 2 + 0{,}03\mathrm{Re}^{0{,}54}\mathrm{Pr}^{0{,}33} + 0{,}35\mathrm{Re}^{0{,}58}\mathrm{Pr}^{0{,}36}, \quad (14)$$

где Nu — число Нуссельта; Re — число Рейнольдса; Pr — число Прандтля.

Число Нуссельта, определяющее интенсивность конвективного теплообмена между поверхностью частицы и потоком газа, можно представить в следующем виде:

$$\mathrm{Nu} = \alpha d_{ч}/\lambda, \quad (15)$$

где α — коэффициент теплоотдачи от частицы к газу, Вт/(м^2·К); λ — коэффициент теплопроводности газовой среды, Вт/(м·К).

Формула для расчета числа Прандтля:

$$\mathrm{Pr} = \nu/a, \quad (16)$$

где a, ν — соответственно коэффициенты температуропроводности и кинематической вязкости газовой смеси, м^2/с.

Для более интенсивного отвода тепла от частицы, помимо охлаждения излучением, используется конвективное охлаждение в потоке смеси инертных газов (аргон и гелий). Процентный состав смеси определяется технологией и свойствами инертных газов:

— гелий имеет на порядок большую теплопроводность, чем аргон, что обеспечивает большие скорости охлаждения частиц;

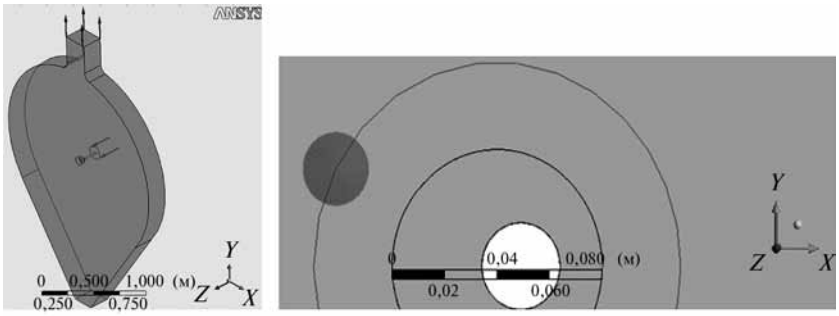
— аргон имеет большую плотность, чем гелий, что увеличивает время полета частицы в камере, отчасти компенсируя меньшую теплопроводность аргона, который, имея меньший потенциал ионизации, чем гелий, также обеспечивает устойчивость дугового разряда.

Исходные данные для построения модели. Задачей моделирования является исследование скорости движения газовой смеси в камере распыления и режимов охлаждения стенок камеры.

Газовая смесь подается в камеру распыления через отверстие диаметром 140 мм, расположенное соосно с электродом (рис. 2, *а*). Через это же отверстие факел плазмы подается на торец электрода с эксцентриситетом 20 мм (рис. 2, *б*).

В данной модели химический состав газовой среды составляет 90 % гелия и 10 % аргона, что обеспечивает для частиц наиболее благоприятный режим охлаждения частиц и устойчивость дугового разряда плазмы.

Принимаем следующие значения исходных параметров модели: избыточное давление в камере p = 131 723 Па; температура плазменного факела $T_{пл}$ = 3000 °С; температура электрода $T_{эл}$ = 1600 °С; расход газовой смеси $Q_{газ} = 19 \cdot 10^{-3}$ м^3/с; температура газовой смеси на входе $T_{вх}$ = 40 °С; зазор между плазматроном и электродом Δ = 20 мм; диаметр факела



а) *б)*

Рис. 2. Исходная геометрическая модель технологической установки для получения гранул методом PREP:

а — отверстие для подачи газовой смеси; *б* — схема подачи факела плазмы на торец электрода

плазмы $D_{пл}$ = 30 мм; частота вращения электрода n = 15 000 об/мин.

В основу решения задачи в рамках программного комплекса ANSYS CFX положен алгоритм, суть которого заключается в раздельном решении для каждой степени свободы (температуры, давления, скорости) системы матриц, полученных конечно-элементной дискретизацией системы дифференциальных уравнений.

Целью расчета является получение распределения температуры, давления, скорости в процессе полета частицы. Теплообмен между поверхностью частицы и газом осуществляется путем конвекции и лучистым переносом. Частица сферической формы, обладающая высокой начальной скоростью, двигается в газовой среде.

Результаты численного моделирования. Математическая модель процесса получения гранул методом PREP имеет важное прикладное значение, так как позволяет анализировать процесс при различных значениях исходных данных. Поле скоростей газовой смеси в камере распыления представлено на рис. 3 (см. обложку).

Распределение коэффициентов теплоотдачи от источников тепла к газовой смеси около поверхности электрода и в области стенки камеры распыления во время процесса охлаждения частиц приведено на рис. 4 (см. обложку).

Скорость охлаждения при кристаллизации частиц определяет структурные параметры гранулы — размер зерна, расстояние между ветвями дендритов, размер частиц вторичных фаз. Знание скорости охлаждения помогает выбирать: оптимальные значения конструктивных параметров специализированного оборудования (диаметр камеры распыления, расположение спреера для организации дополнительного конвективного охлаждения, диаметр форсунок и др.); химический состав и температуру газовой смеси на входе, определяемую мощностью холодильного агрегата.

Температурное поле в камере распыления и на выходном патрубке газа показано на рис. 5 (см. обложку).

Разработанная численная модель позволяет прогнозировать важнейшие параметры процесса получения гранул методом PREP: поле скоростей газовой смеси, распределение коэффициентов теплоотдачи от источников тепла к газовой смеси, температурное поле газовой смеси.

Заключение. Построена математическая модель получения металлических гранул различного химического состава методом вращающегося электрода с плазменным нагревом (PREP). Численное моделирование процесса охлаждения частиц распыленного металла в газовой среде позволяет конструкторам и технологам прогнозировать и рассчитывать важнейшие параметры технологического процесса получения гранул методом PREP и выбирать наиболее выгодные значения параметров оборудования для промышленной реализации в целях получения необходимой структуры и свойств гранул.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Герман Рендалл М.** Порошковая металлургия от А до Я. Учебно-справочное руководство / Пер. с англ. О.В. Падалко и Г.А. Либенсон. М.: ИД Интеллект, 2009. 336 с.
2. **Теория** и практика процесса прессования гетерофазных увлажненных механических смесей на основе железа / В.Н. Кокорин, А.И. Рудской, В.И. Филимонов, Е.М. Булыжев, С.Ю. Кондратьев. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2012. 236 с.
3. **Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Кокорин В.Н.** Прессование гетерофазных увлажненных порошковых металлических смесей для повышения качества высокоплотных заготовок с использованием метода интенсивного уплотнения // Справочник. Инженерный журнал. 2011. № 6. С. 12—16.
4. **Исследование** процесса уплотнения при ультразвуковом воздействии на увлажненную порошковую среду / А.И. Рудской, С.Ю. Кондратьев, В.Н. Кокорин, Н.А. Сизов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 3 (178). С. 148—155.
5. **Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А.** Технология послойного электронно-лучевого синтеза порошковых изделий в вакууме // Заготовительные производства в машиностроении. 2014. № 8. С. 40—45.
6. **Kondrat'ev S.Yu., Gorynin V.I., Popov V.O.** Optimization of the parameters of the surface-hardened layer in laser quenching of components // Welding International. August 2012. V. 26. N. 8. P. 629—632.
7. **Кондратьев С.Ю., Горынин В.И., Попов В.О.** Оптимизация параметров поверхностно-упрочненного слоя при лазерной закалке деталей // Сварочное производство. 2011. № 3. С. 11—15.
8. **Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А., Копаев В.Н.** Исследование движения расплавленной гранулы по поверхности формируемого изделия в процессе электронно-лучевого синтеза изделий // Металлообработка. 2014. № 1 (79). С. 27—31.
9. **Колбасников Н.Г., Кондратьев С.Ю.** Структура. Энтропия. Фазовые превращения и свойства металлов. СПб: Наука, 2006. 363 с.

Андрей Иванович Рудской, член-кор. РАН, д-р техн. наук;
Сергей Юрьевич Кондратьев, д-р техн. наук,
petroprom2013@yandex.ru;
Юрий Алексеевич Соколов, канд. техн. наук;
Владимир Николаевич Копаев

УДК 669.018.9

Ю.А. Курганова, Ю.А. Лопатина
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

Анализ распределения армирующей фазы в алюмоматричных композиционных материалах

Проведен анализ равномерности распределения наполнителя по сечению в ряде образцов дисперсно-упрочненных композиционных материалов системы Al + SiC с помощью классических и компьютерных методов количественного металлографического анализа изображений. Также в качестве индикатора равномерности распределения наполнителя в матричном сплаве предложено рассматривать распределение твердости по сечению образцов. Сделан вывод о целесообразности использования рассматриваемых методов анализа и даны рекомендации по получению композитов данной группы.

Ключевые слова: дисперсно-упрочненные композиционные материалы; металломатричные композиционные материалы; оценка равномерности распределения наполнителя; количественный металлографический анализ; микротвердость.

Analysis of filler distribution uniformity in cross section of particulate-reinforced composite materials samples of the system Al + SiC is carried out by means of classical and computer quantification metallographic image analysis methods. Also hardness distribution in cross section of samples as indicator of reinforcement distribution uniformity in the matrix is offered. Conclusions about advisability of using considered methods of analysis are drawn and recommendations about production of composite material of this group are given.

Keywords: particulate-reinforced composite materials; metal matrix composite materials; uniformity of filler distribution; quantification metallographic analysis; microhardness.

Введение. В связи с постоянно растущими требованиями к повышению рабочих характеристик материалов при одновременном снижении или сохранении плотности создание новых материалов является одной из ключевых задач современного материаловедения. Одним из эффективных путей решения этой задачи является разработка технологий и создание композиционных материалов.

Композиционные материалы (КМ) — это особый класс гетерофазных материалов, состоящих из наполнителя и связующего (матрицы) с четко выраженной границей раздела фаз. Совместная работа разнородных компонентов в КМ дает эффект, равносильный созданию нового материала, свойства которого количественно и качественно отличаются от свойств каждого из составляющих. Многообразие форм композиционных материалов позволяет направленно регулировать прочность, жесткость, уровень рабочих температур и другие свойства путем подбора состава или изменения соотношения компонентов.

Эффективность использования композитов зависит от числа, размеров, формы, характера расположения и физико-механических свойств структурных составляющих, а также от прочности связи между ними. Традиционно матрица обеспечивает передачу и равномерное распределение нагрузки. Механические характеристики металлических матриц позволяют препятствовать распространению магистральной трещины и формируют компактный материал с заданным геометрическим расположением наполнителя.

Наиболее перспективными материалами для матриц металлических композиционных материалов являются металлы, обладающие небольшой плотностью. Особенно выгодно среди них отличается алюминий, обладающий высокой коррозионной стойкостью и являющийся высокотехнологичным конструкционным материалом. Технологичным армирующим материалом в плане обеспечения термодинамической и химической совместимости компонентов для алюмоматричных композитов является карбид кремния SiC. В настоящее время интенсивно разрабатываются композиты на основе алюминиевых сплавов, наполненные частицами карбида кремния.

Важными характеристиками дисперсно-упрочненных алюмоматричных КМ являются их низкая плотность и высокие удельные характеристики. Сохраняя все преимущества

алюминиевых сплавов (низкая плотность, высокая технологичность и т.д.), армирование дисперсными частицами карбида кремния затрудняет скольжение дислокаций, что значительно повышает прочностные характеристики, практически не влияя на плотность (ρ_{Al} = = 2,7 г/см^3; ρ_{SiC} = 3,21 г/см^3), а следовательно, и массу материала.

Одной из основных технологических проблем формирования дисперсно-упрочненных КМ является обеспечение однородности распределения армирующей фазы в матрице. Однородность распределения наполнителя по телу матрицы оказывает особое влияние на механические и эксплуатационные свойства композиционного материала. Важно отметить, что при относительно однородном распределении армирующей фазы и лучшей межфазной прочности образцы КМ имеют более высокие эксплуатационные свойства.

Получение образцов. При изготовлении композиционного материала необходимо обеспечить ряд определенных требований: равномерное или функциональное распределение армирующего наполнителя, заданный уровень прочности связи по границе раздела матрица—наполнитель, простота и экономичность процесса.

Из ряда технологий изготовления металломатричных композиционных материалов, упрочненных дисперсными наполнителями, выбрано два способа совмещения алюминиевой матрицы с частицами карбида кремния: способ механического замешивания наполнителя в матричный расплав, относящийся к группе жидкофазных методов, и способ механического легирования с последующей экструзией, относящийся к твердофазным методам.

Жидкофазный метод. Образцы, изготовленные жидкофазным методом механического замешивания частиц в расплав, получены на базе ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН. Качество получаемых этим способом КМ (распределение армирующего наполнителя, уровень межфазной связи, наличие продуктов взаимодействия и пр.) зависит от состава матричного расплава, условий замешивания и последующей обработки.

Технологически значимыми параметрами при литье являются конструкция установки для замешивания, температуры расплава и предварительного нагрева частиц, скорость вращения лопаток импеллера, длительность замешивания и выдержки композиционной смеси перед заливкой, скорости кристаллизации, режимы последующих термических или термомеханических обработок.

Исследовали ряд образцов, полученных по технологии механического замешивания частиц с объемной концентрацией 5; 10 и 15 % в расплавы матриц АК12 (АЛ2), АК12М2МгН (АЛ25), В124 и Д16.

Химический состав матриц АК12 (АЛ2), АК12М2МгН (АЛ25) и В124 приведен в табл. 1, состав матрицы Д16 — в табл. 2.

Частицы карбида кремния имеют средний размер 28 мкм. Температура при введении частиц в расплав 750 °С. Предварительно частицы SiC для улучшения смачиваемости жидким металлом и последующего равномерного распределения частиц в матрице подвергают ультразвуковой обработке.

Смесь жидкой матрицы и частиц перемешивают в печи в течение 1 мин со скоростью вращения импеллера 600 об/мин. Образцы на основе сплава Д16 подвергали последующей

1. Химический состав матриц исследуемых образцов по ГОСТ 1583—93, % мас.

Марка сплава	Si	Cu	Mg	Mn	Ti	Zn	Cr	Fe	Другие элементы	Al
АК12 (АЛ2)	10...13	0,6	0,1	0,5	0,1	0,3	—	—	0,1 Zr	Основа
АК12М2МгН (АЛ25)	11...13	1,5...3,0	0,8...1,3	0,3...0,6	0,05...0,2	0,5	0,2	0,7	0,8...1,3 Ni	
В124	8...11	3...4	0,15...0,35	0,1...0,3	0,1...0,3	—	—	0,3	0,01...0,1 B	

2. Химический состав матриц исследуемых образцов по ГОСТ 4784—97, % мас.

Марка сплава	Si	Cu	Mg	Mn	Ti	Zn	Ni	Cr	Fe	Al
Д16	0,5	3,8...4,9	1,2...1,8	0,3...0,9	0,15	0,25	—	0,1	0,5	Основа
В95	0,5	1,4...2,0	1,8...2,8	0,2...0,6	0,05	5,0...7,0	0,1	0,1...0,25	0,5	

термической обработке в целях дисперсионного твердения матрицы и формирования в ней оптимальной устойчивой дислокационной субструктуры, позволяющей в максимальной мере реализовать потенциальные возможности материала. Образцы с дюралюминиевой матрицей подвергали закалке в холодную воду при температуре 495...500 °С и старению при температуре 150 °С в течение 30 мин.

Твердофазный метод. Образцы, изготовленные твердофазным методом, получены на базе ФГУП "ВИАМ". На первом этапе происходит предварительное перемешивание порошков алюминиевого сплава и дисперсных частиц карбида кремния в вибросмесителе до получения гомогенной смеси.

Далее смесь подвергают механическому легированию для обеспечения стабильного равномерного распределения частиц армирующей фазы в матрице. Эту операцию осуществляют в аттриторе — вертикальном неподвижном барабане с загруженными в него шарами из твердых материалов. Внутри барабана с частотой вращения в несколько сотен оборотов в минуту вращается вертикальная лопастная мешалка. Гребки на лопастях мешалки заставляют циркулировать мелющие шары по всему объему аттритора. В результате измельчаемый материал интенсивно истирается.

Полученные гранулы композиционного материала подвергают горячему компактированию — принудительному уплотнению с приложением давления и температуры. Гранулы композита имеют большую площадь поверхности с высокой избыточной энергией. При увеличении давления появляется контакт между отдельными частицами и энергия системы уменьшается. Как следствие, образование монолитного материала становится энергетически выгодным.

Давление и температуру процесса в каждом конкретном случае подбирают отдельно, технология ориентируется на отдельные типы изделий. Полученный компакт композиционного материала подвергают экструзии (от лат. extrusio — выталкивание) — технология получения изделий путем продавливания расплава материала через формующее отверстие.

Исследовали образцы на основе матриц Д16 и В95 с объемным содержанием карбида кремния 20 %, полученные по изложенной выше технологии. Химический состав матриц приведен в табл. 2. Также рассматривали образцы аналогичного состава, но полученные по измененной технологии, исключающей операцию *механического легирования* (МЛ).

Средний размер частиц порошков матричных сплавов составлял 10 мкм, средний размер частиц карбида кремния 120 мкм. Компактирование и последующую экструзию проводили при температуре 450 °С. В качестве завершающей операции была проведена термическая обработка по оптимальным для данных матричных сплавов режимам: для композита на основе сплава Д16 закалка в воду при температуре (495 ± 5) °С и естественное старение более 72 ч, для композита на основе сплава В95 закалка в воду при температуре 465...475 °С и старение при температуре 140 °С в течение 16 ч.

Анализ равномерности распределения. Равномерность распределения частиц в объеме композита является управляемой характеристикой. На однородность распределения наполнителя оказывают влияние такие факторы, как состав матрицы, размер армирующих частиц, условия кристаллизации композиционного расплава. Для оценки равномерности распределения армирующей фазы использовали следующие методики: макроскопический анализ, микроскопический анализ, анализ распределения твердости по сечению образца.

Макроскопический анализ. Макроструктурным анализом называется метод исследования строения металлов и сплавов невооруженным глазом или при небольших увеличениях — до 30 раз. Изображения образцов с увеличением в 25 раз приведены на рис. 1. Анализ данных изображений позволяет в первом приближении назвать распределение армирующей фазы равномерным.

Микроскопический анализ. Изображения микроструктуры были получены на металлографическом микроскопе OlympysGX51F на шлифах образцов, предварительно изготовленных на оборудовании фирмы Struers для пробподготовки.

Для оценки содержания объемной доли карбида кремния в исследуемых образцах применяли точечный метод А.А. Глаголева: на изображение микрошлифа накладывали сетку и подсчитывали число точек, попавших на включения карбида кремния. Количественное содержание частиц в исследуемом КМ определяли по формуле

$$C = \frac{A}{B} \cdot 100\,\%,$$

где C — содержание частиц в матрице, %; A — число точек, попавших на частицы; B — общее число точек.

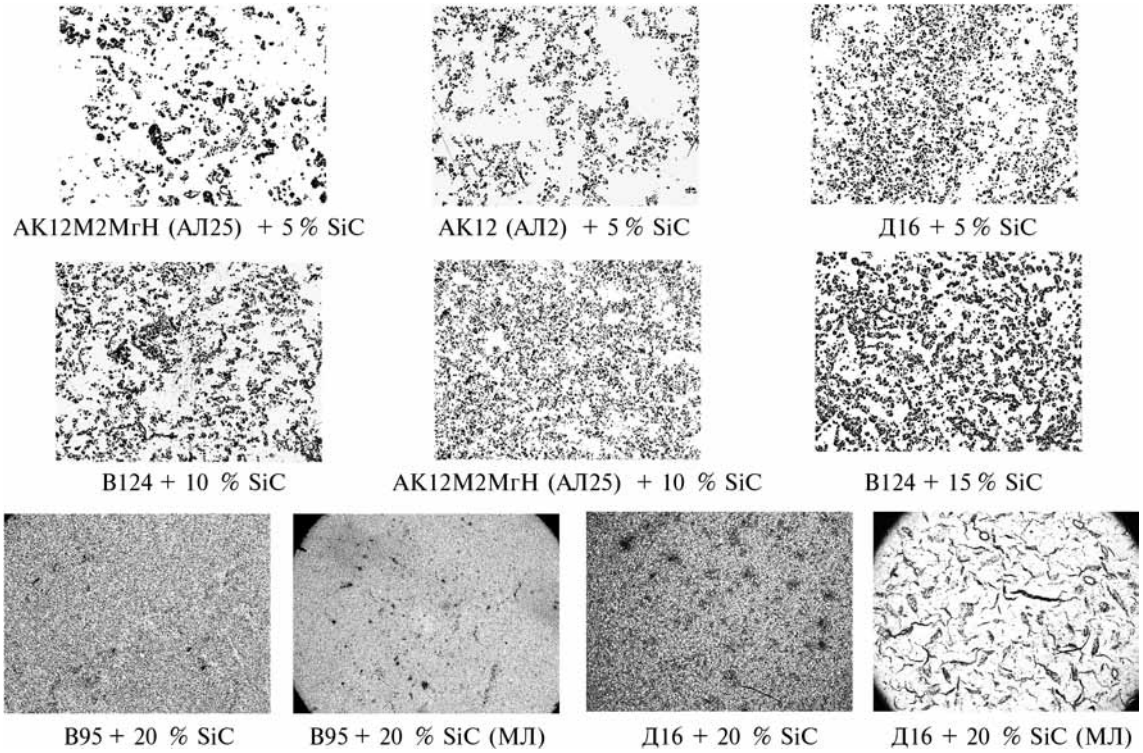


Рис. 1. Макроструктура образцов. ×25

Размер исследуемых изображений 270×200 мм, шаг сетки 10 мм. Всего на шлифе 588 точек. Анализ проводили в графическом пакете КОМПАС-3DV 14 на четырех изображениях для каждого сплава, для литых композитов при увеличении в 100 раз, для порошковых — в 1000 раз. Пример реализации метода Глаголева для КМ Д16 + + 5 % SiC представлен на рис. 2.

Таким образом, зная содержание карбида кремния в четырех случайных точках для каждого сплава и оценив, насколько реальное содержание в каждой точке отличается от теоретического, можно определить, насколько равномерно распределены частицы по объему матрицы. Результаты расчета приведены в табл. 3.

По результатам расчета получили увеличение среднего отклонения расчетного значения содержания SiC от теоретического с увеличением содержания карбида кремния в образцах.

Анализ изображений методом Глаголева трудоемок и низко эффективен для исследуемого ряда образцов. В настоящее время существует программное обеспечение, позволяющее определить содержание контрастной фазы по фотографии микрошлифа. Для этого изображение должно быть предварительно подготовлено и обработано таким

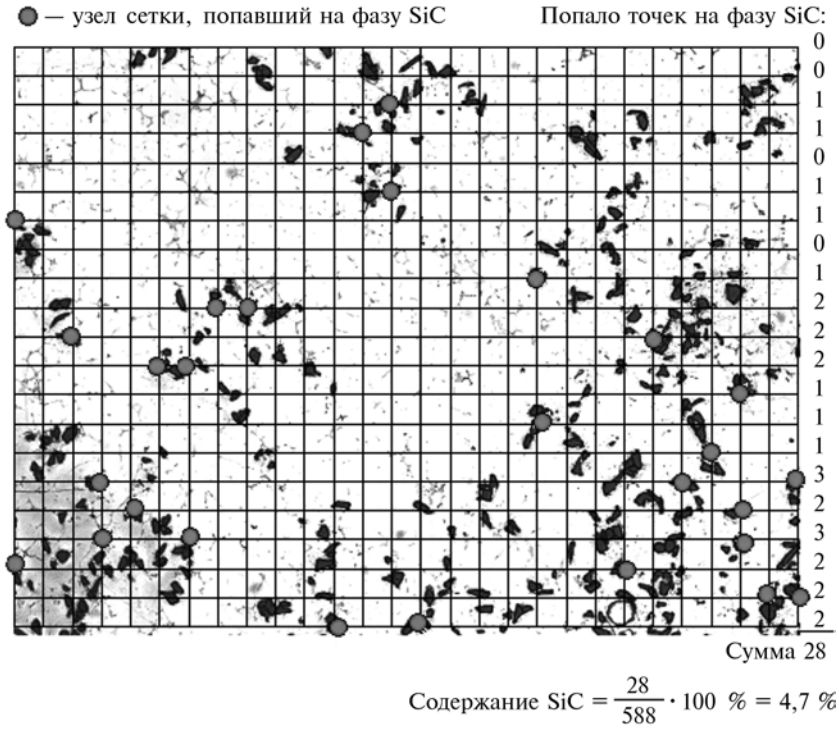


Рис. 2. Реализация метода Глаголева для оценки однородности распределения армирующей фазы на примере КМ Д16 + 5 % SiC. ×100

3. Содержание SiC, %, в четырех случайных точках образца и среднее отклонение от теоретического значения

Образец	Номер точки				Среднее отклонение, %
	1	2	3	4	
АК12М2МгН (АЛ25) + + 5 % SiC	6,3	2,9	6,4	4,7	25,5
АК12 (АЛ2) + 5 % SiC	6,3	5,3	4,4	3,7	17,5
Д16 + 5 % SiC	4,6	3	5,9	4,7	18,0
АК12М2МгН (АЛ25) + + 10 % SiC	9,3	9,0	9,0	12,2	11,3
В124 + 10 % SiC	9,2	9,0	10,9	9,8	7,3
В124 + 15 % SiC	15,5	12,9	12,7	16,2	10,2
В95 + 20 % SiC	20,9	20,4	22,8	17,8	7,9
В95 + 20 % SiC (МЛ)	21,7	21,4	23,3	20,2	8,3
Д16 + 20 % SiC	22,9	21,7	21,9	18,0	10, 6
Д16 + 20 % SiC (МЛ)	20,2	17,8	21,6	23,5	9,4

образом, чтобы область анализируемой фазы оказалась прокрашена монохромным цветом.

Задачу выделения армирующей фазы монохромным цветом также можно решить с помощью специального программного обеспечения. Принцип действия таких программ основывается на перепаде яркости между частицами и фоном. Анализ затрудняется в случае присутствия в структуре материала нескольких контрастных фаз, так как во многих случаях они оказываются неотличимы друг от друга для заложенного в программе алгоритма.

Подобную проблему наблюдали при анализе композитов с матрицами из литейных алюминиевых сплавов: в их структуре в большом количестве присутствует эвтектика, неотличимая по перепаду яркости от частиц карбида кремния. Задача отделения изображения эвтектики от карбида была успешно решена студентом кафедры материаловедения МГТУ им. Н.Э. Баумана А.В. Заводовым. В данной работе использована его авторская программа Analysis, учитывающая морфологию фаз, присутствующих на обрабатываемом изображении. На рис. 3 показана работа данной программы на примере композита АК12 (АЛ2) + 5 % SiC.

Обработанные подобным образом фотографии микрошлифов загружали в программу для количественного анализа изображений Image ExpertPro 3, которая с помощью заложенных функций определяла содержание выделенной фазы. В табл. 4 представлены результат работы программы и среднее отклонение теоретического значения содержания армирующей фазы от расчетного.

Результаты расчета согласовываются с предыдущим выводом: наблюдается увеличение среднего отклонения расчетного значения со-

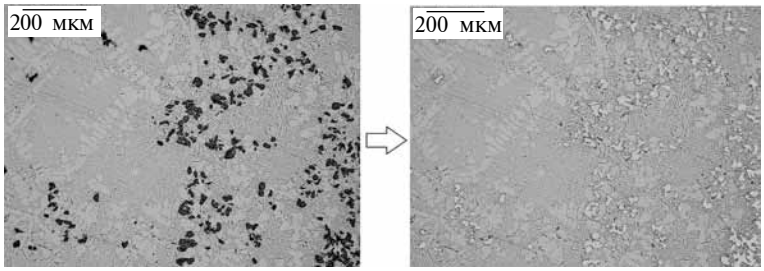
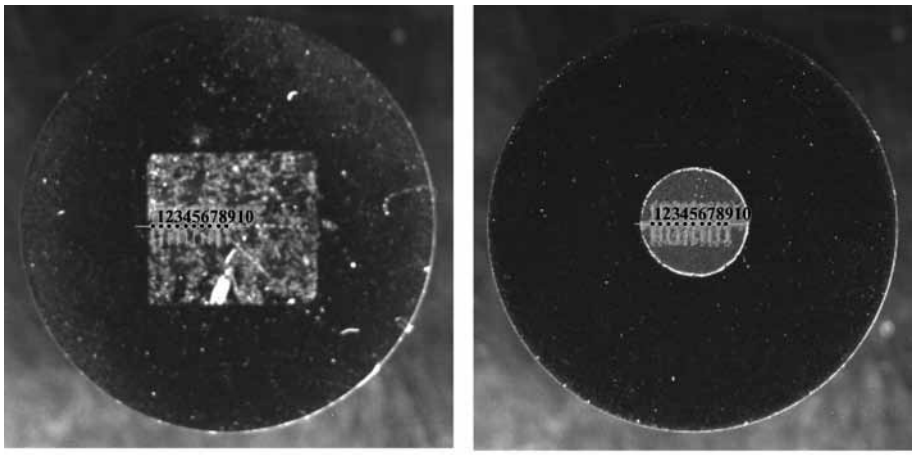


Рис. 3. Выделение армирующей фазы монохромным цветом с помощью авторской программы Analysis

4. Содержание SiC в 10 случайных точках образца и среднее отклонение реального значения содержания SiC от теоретического

Образец	Номер точки										Среднее отклонение, %
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
АК12М2МгН (АЛ25) + 5 % SiC	6,3	6,7	7,0	8,0	6,4	8,7	6,6	7,8	6,4	5,5	38,8
АК12 (АЛ2) + 5 % SiC	6,9	6,7	4,1	8,4	6,6	5,1	6,7	8,3	8,4	6,8	36,0
Д16 + 5 % SiC	9,2	7,1	7,4	4,2	3,9	4,7	7,1	8,2	6,7	6,8	30,6
АК12М2МгН (АЛ25) + 10 % SiC	12,9	11,9	11,9	13,0	12,5	13,2	12,5	12,0	12,9	10,9	23,7
В124 + 10 % SiC	10,5	12,6	10,1	9,0	12,3	11,9	12,8	12,3	9,6	12,6	13,7
В124 + 15 % SiC	17,0	18,7	15,3	17,0	15,4	17,2	18,4	16,2	13,5	18,3	11,3
В95 + 20 % SiC	19,9	22,2	21,2	23,2	23,6	21,9	24,2	18,6	19,2	19,6	6,8
В95 + 20 % SiC (МЛ)	25,3	17,0	22,4	25,2	20,0	22,8	22,3	16,0	21,3	25,4	8,9
Д16 + 20 % SiC	25,5	22,2	21,8	21,5	22,6	24,8	24,7	25,9	24,4	19,9	16,7
Д16 + 20 % SiC (МЛ)	13,1	19,6	20,1	20,1	17,6	25,1	15,2	27,8	24,8	26,7	5,1



а) *б)*

Рис. 4. Распределение мест замера (точек) для серийного измерения микротвердости в зависимости от вида образца:

а — литые КМ; *б* — порошковые КМ

держания SiC от теоретического с повышением содержания карбида кремния в образцах.

Анализ распределения твердости. Твердость является важной механической характеристикой материала. В случае с дисперсно-упрочненными материалами равномерность распределения твердости может косвенно характеризовать равномерность распределения армирующего компонента в матрице. Поэтому в качестве индикатора равномерности распределения армирующей фазы в матричном сплаве кроме металлографического анализа предложено рассматривать распределение твердости по сечению образцов.

Замеры твердости осуществляли на твердомере фирмы Emco-test Dura Scan 70 по методу замера микротвердости (ГОСТ 9450—76). В поверхность материала вдавливается алмазная четырехгранная пирамида с углом при вершине 136° с малой нагрузкой вдавливания: 0,049 (5); 0,098 (10); 0,196 (20); 0,490 (50); 0,981 (100); 1,962 (200) или 4,905 (500) Н (гс).

При вычислении средней твердости материала значение нагрузки вдавливания подбирается таким образом, чтобы размер диагонали отпечатка был значительно больше размера структурных составляющих. После снятия нагрузки вдавливания измеряют диагональ отпечатка. Значение твердости подсчитывают как отношение нагрузки к площади поверхности пирамидального отпечатка. Продолжительность выдержки индентора под нагрузкой принимают для цветных металлов равной 30 с.

На образцах проводили серию из 10 измерений с шагом 0,5 мм. Распределение точек для разных видов образцов представлено на рис. 4.

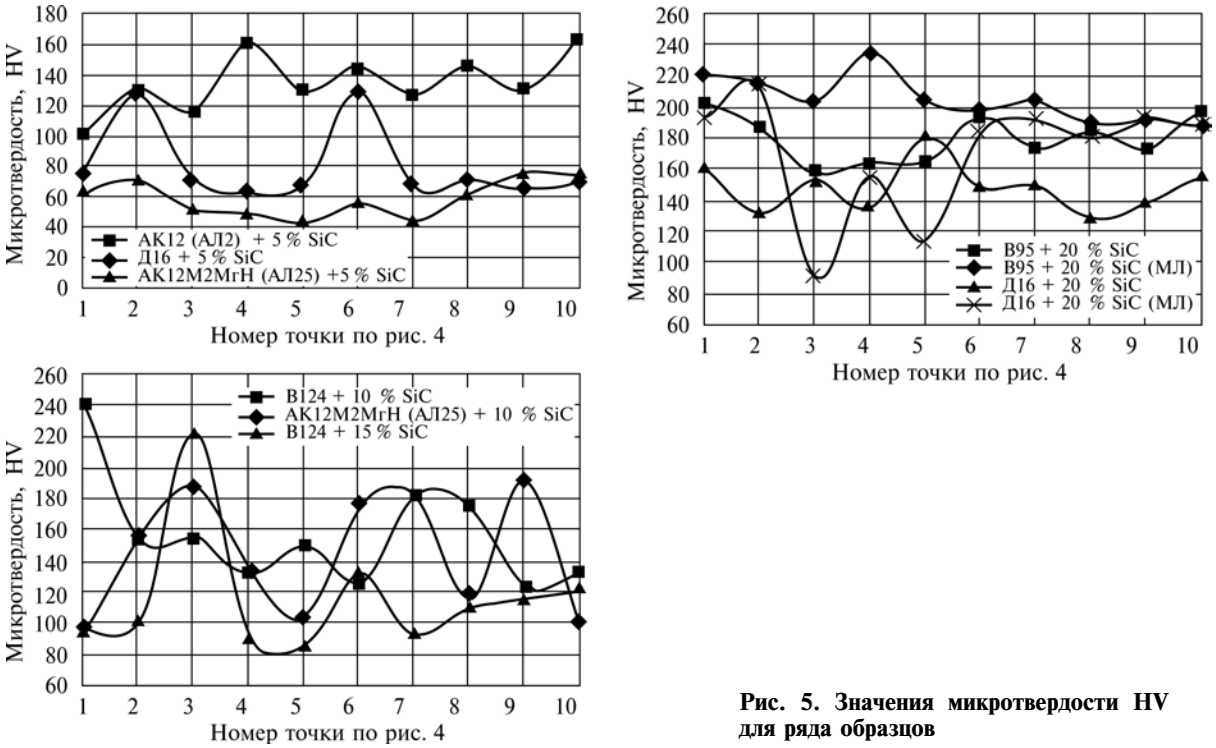


Рис. 5. Значения микротвердости HV для ряда образцов

Сила вдавливания индентора составляла 0,098 Н (10 гс). Результаты замеров представлены на рис. 5.

Значительный разброс значений твердости в пределах одного образца свидетельствует о наличии скоплений частиц упрочняющего компонента и зон матричного сплава, обедненных армирующей фазой. Резкие, отчетливо заметные на фоне остальных значений скачки твердости наблюдаются в случаях непосредственного проникновения индентора в частицу и в расчет могут не приниматься.

Видно, что в литых композитах с малым содержанием карбида кремния (5 %) распределение твердости по сечению достаточно равномерное. Наибольший разброс значений наблюдается в композите с матрицей Д16 (до 63 HV). В литых композитах со средним содержанием карбида кремния (10 и 15 %) разброс значений твердости для всех матриц заметно больше. В порошковых композитах с содержанием карбида кремния 20 % разброс твердости мал — до 45 HV, за исключением КМ Д16 + 20 % SiC с механическим легированием (122 HV).

Заключение. Равномерность распределения карбида кремния во всех образцах достаточная для обеспечения требуемого уровня свойств. Наиболее равномерно армирующая фаза распределена в порошковых композитах. Наименее равномерное распределение SiC по результатам анализа твердости наблюдается в литых композитах с содержанием карбида кремния 10 и 15 %.

Выбранные методики анализа позволяют в достаточной мере оценить равномерность распределения армирующей фазы по сечению образца. Так, метод Глаголева отличается большей трудоемкостью по сравнению с программным анализом, обладает низкой эффективностью и достаточно трудно реализуем для изображений с высокодисперсной фазой, в данном случае изображений порошковых композитов, прошедших операцию механического легирования. Методу Глаголева стоит отдавать предпочтение в том случае, если число обрабатываемых изображений мало или если пользователю предстоит обрабатывать изображения низкого качества либо содержащие в структуре эвтектику.

Для обоих методов микроскопического анализа наблюдается корреляция между содержанием армирующей фазы и рассчитанным значением среднего отклонения, что приводит к выводу о субъективности данных методов, связанной с неизбежной необходимостью визуальной оценки изображений наблюдателем и вносимой из-за этого ошибки. Для объективной оценки следует обращаться также к косвенным методам анализа распределения армирующей фазы, таким как анализ распределения твердости по сечению образца.

В соответствии с данными выводами, можно дать рекомендацию по получению дисперсно-упрочненных алюмоматричных композиционных материалов с малым содержанием армирующей фазы по литейной технологии, со средним и высоким — по порошковой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Литые** дисперсно-упрочненные алюмоматричные композиционные материалы: изготовление, свойства, применение / Т.А. Чернышова, Ю.А. Курганова, Л.И. Кобелева, Л.К. Болотова. Ульяновск: УлГТУ, 2012. 295 с.

2. **Матюнин В.М.** Механико-технологические испытания и свойства конструкционных материалов: учеб. пособие. М.: Изд-во МЭИ, 2005. 140 с.

3. **Мэттьюз Ф., Ролингс Р.** Композиционные материалы: механика и технология. М.: Техносфера, 2004. 408 с.

4. **Анализ** перспективности использования дисперсно-упрочненных алюмоматричных композиционных материалов системы Al—SiC в изделиях авиационного назначения / Ю.А. Курганова, В.В. Березовский, Г.П. Фетисов, А.А. Шавнев // Технология металлов. 2013. № 10. С. 50—55.

5. **Лопатина Ю.А., Курганова Ю.А.** Оценка влияния армирующей фазы на твердость алюмоматричных композиционных материалов // Труды Всероссийской науч.-техн. конф. "Студенческая весна 2014: Машиностроительные технологии". М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. № гос. регистрации 0321400749. URL: studvesna.ru?go=articles&id=985 (дата обращения: 15.09.2014).

Юлия Анатольевна Курганова, д-р техн. наук,
kurganova_ya@mail.ru;
Юлия Александровна Лопатина

ООО "Издательство **Машиностроение"**, 107076, Москва, Стромынский пер., 4
Учредитель ООО "Издательство Машиностроение". **E-mail: zpm@mashin.ru**
Тел. редакции журнала: (499) 268-47-19, 269-54-96. http://www.mashin.ru
Дизайнер *Подживотов К.Ю.* Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 11.02.2015. Подписано в печать 23.03.2015. Формат 60 × 88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: **www.aov.ru**
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.