

УДК 669.245:621.791(964+92)

# ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ АКТИВНЫХ ГАЗОВ И СПЛОШНОСТИ ДИСПЕРСНОЙ ПРИСАДКИ НА ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ ВАЛИКА ПРИ МИКРОПЛАЗМЕННОЙ ПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКЕ НИКЕЛЕВЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

К. А. ЮЩЕНКО, А. В. ЯРОВИЦЫН

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Рассмотрены особенности формирования наплавленного металла при микроплазменной порошковой наплавке никелевых жаропрочных сплавов в зависимости от наличия в присадочном порошке активных газов. Исходя из содержания кислорода и азота, установлены условия качественного формирования наплаваемого металла и требования к присадочным порошкам. Показана взаимосвязь между наличием микропор в наплавленном металле и присутствием их внутри дисперсных частиц порошка. Описан вероятный механизм образования микропористости, оценено влияние технологических параметров процесса на количество и размер микропор в наплавленном металле. Библиогр. 25, табл. 2, рис. 10.

*Ключевые слова:* микроплазменная порошковая наплавка, никелевые жаропрочные сплавы, наплавленный металл, присадочный порошок, кислород и азот, микропористость порошка и наплавленного металла

Известно, что наличие дефектов в сварных соединениях, в частности отклонений от заданной формы и сплошности наплавленного металла, приводит к значительному снижению эксплуатационных характеристик изделия [1].

Основные  $\gamma'$ -образующие элементы никелевых жаропрочных сплавов, алюминий и титан; хром, а также другие тугоплавкие легирующие элементы в результате их высокого сродства к кислороду являются причиной образования при сварке плавлением тугоплавких оксидов [2–5], в частности, включений в наплавленном металле, несплавлений. Их присутствие в сварочной ванне вызывает необходимость существенного повышения сварочного тока для обеспечения приемлемой растекаемости наплаваемого металла [4, 5]. Ввиду ограниченной свариваемости никелевых сплавов с содержанием  $\gamma'$ -фазы более 45 об. %, повышение удельных тепловложений увеличивает вероятность образования горячих трещин при сварке и трещин в процессе последующей термической обработки [2, 5, 6]. Поэтому обеспечение качественного формирования наплаваемого металла для таких материалов тесно взаимосвязано с технологической прочностью сварного соединения и, наряду с оптимальной структурой, является важнейшей составляющей качества и эксплуатационной надежности сварных соединений.

Процесс микроплазменной порошковой наплавки применяется при ремонте уплотнительных, антивибрационных элементов лопаток авиационных газотурбинных двигателей [7, 8].

Для данного процесса серийно производятся присадочные распыленные порошки никелевых сплавов с различным содержанием  $\gamma'$ -фазы. Поступление в наплавленный металл никелевых жаропрочных сплавов относительно небольшого количества активных газов [9] может вызвать отклонения от его качественного формирования. Исходя из опыта наплавки и эксплуатации восстановленных лопаток, важным является качество дисперсной присадки, которое, в частности определяется содержанием кислорода и азота.

В порошковой металлургии известно об отрицательном влиянии микропор в дисперсных частицах на служебные свойства изделий. Механизм их образования в процессе распыления расплава инертным газом описан в работах [2, 10, 11]. Он протекает в четыре стадии: внедрение порций газа-энергоносителя в струю расплава, вытекающую из форсунки; распад порций газа на пузырьки в струе расплавленного металла; распад струи на фрагменты, часть из которых несет газовые пузырьки; охлаждение и кристаллизация капель металла с газовыми пузырьками и без них. Вследствие ограниченных тепловложений в изделие и времени пребывания металла сварочной ванны в расплавленном состоянии сплошность частиц присадочного порошка также может влиять на процесс формирования наплаваемого валика при микроплазменной наплавке.

Цель настоящей работы — уточнение диапазонов содержания кислорода и азота в материале

дисперсной присадки, а также изучение причин и закономерностей образования микропористости в наплавленном металле никелевых жаропрочных сплавов.

Объектами исследования являлся наплавленный металл и присадочные порошки никелевых жаропрочных сплавов с содержанием  $\gamma'$ -фазы более 45 об. %. Для количественной оценки активных газов в металле использовали метод вакуумной экстракции [9, 12, 13]. Содержание активных газов в литом, наплавленном металле и присадочном порошке определяли на установках фирмы Лесо РО316 (кислород) и TN 114 (азот).

При наплавке использовали присадочные порошки никелевых и кобальтовых сплавов с размером частиц 63...160 мкм. Для металлографических исследований наплавленного металла варьировались следующие параметры:

- сила сварочного тока 10...65 А;
- диаметр фокусирующего сопла плазмотрона  $d_{\phi} = 5,5$  и 3,0 мм, который определял сосредоточенность ввода порошка в сварочную ванну ( $k_{сп} = 4,8...20 \text{ см}^{-2}$  по методике работы [14]);
- вид подачи порошка (непрерывная в количестве  $G = 5$  г/мин или порционная подача с массой микропорции  $M_0 = 0,02...0,14$  г и периодичностью между их вводом  $T_{п} = 0,5...2,5$  с).

Заготовки шлифов образцов наплавленного металла и проб присадочного порошка запрессовывали в пластмассовую обойму диаметром 30 мм на прессе «Labo Press 3» («Struers»). Металлографический анализ продольного сечения валика наплавленного металла (длина образца 15...22 мм) выполняли на оптическом микроскопе «Neophot 32». Анализ количественного содержания микропор в присадочных порошках проводили по фотоснимкам, полученным на оптическом микроскопе «Jenavert» с помощью цифровой камеры «Micam TCA-5.0». Это позволяло выявлять в наплавленном металле и присадочных порошках микропоры от 5 мкм и оценивать их размер с точностью  $\pm 2,5$  мкм. При расчете площади микропоры принималось, что форма ее сечения — окружность.

В случае обнаружения микропор определяли их следующие количественные показатели: для наплавленного металла — общую площадь микропор  $F_{\text{пн}}$  на площади 50 мм<sup>2</sup>; относительную площадь микропор  $\Pi_{\text{пн}} = 0,02F_{\text{пн}}$ ; для фотоснимков с поперечным сечением частиц присадочного порошка — общее количество частиц  $N$ ; количество частиц с микропорами  $N_{\text{мч}}$ ; относительное количество частиц с микропорами  $\Pi_{\text{мч}} = N_{\text{мч}}/N$ ; общую площадь микропор  $F_{\text{мч}}$ ; условную площадь микропоры на одну частицу порошка  $F_{\text{мч}}/N$ . Анализ частиц дисперсной присадки проводили на шести непересекающихся полях зрения каждое, размер площад-

ки составлял примерно 2 мм<sup>2</sup>; общее количество частиц составляло около 1500 шт. Дополнительно микроструктуру присадочных порошков и отдельных частиц исследовали на электронном микроскопе в обратно рассеянных электронах.

Оценку пикнометрической плотности порошка и его пористости выполняли по методике работы [15]. Масса пробы порошка составляла  $15 \pm 0,03$  г, перед засыпкой в пикнометр порошок просушивали на воздухе при 150 °С в течение 0,5 ч. В качестве пикнометрической жидкости использовали этиловый спирт. Массу пикнометра при последовательных взвешиваниях определяли на аналитических весах ВЛР-200 2-го класса точности по ГОСТ 19491–74. Измерения проводили прямым взвешиванием с точностью  $\pm 2,5$  мг. Пористость, определенную по методике гидростатического взвешивания, рассчитывали как:

$$\Pi_{\text{в}} = 100(1 - \rho_{\text{п}}/\rho) (\%),$$

где  $\rho_{\text{п}}$  — пикнометрическая плотность порошка;  $\rho$  — плотность сплава.

Результаты металлографического анализа и гидростатического взвешивания после статистической обработки соотносили с технологическими параметрами и особенностями микроплазменной порошковой наплавки.

Схема и особенности процесса микроплазменной порошковой наплавки приведены на рис. 1. Как правило, при силе тока до 35 А сварочная ванна имеет форму эллипсоида. В зависимости от величины удельных тепловложений объем ее жидкого металла составляет 2...125 мм<sup>3</sup>. Длительность пребывания его в расплавленном состоянии — 2...20 с.

Проанализировано изменение содержания кислорода и азота в никелевом сплаве с количеством  $\gamma'$ -фазы более 45 об. % после прохождения технологических переделов: литая заготовка — распыленный порошок — наплавленный металл с учетом особенностей его формирования (рис. 2, 3). Ранее опубликованные в нашей работе [9] данные были дополнены, обобщены и представлены на рис. 2 в виде диапазонов содержания данных газов. Показано, что качественное формирование наплавленного металла достигается при содержании в нем кислорода не более 0,0180 % и азота не более 0,0055 мас. %. Визуальными наблюдениями установлено, что наплаваемый металл хорошо растекается и смачивает основной металл; на поверхности сварочной ванны отсутствует оксидная пленка.

Формирование наплаваемого металла ухудшается, если содержание кислорода и азота в наплавленном металле соответственно превышает более 0,0220 и 0,0050 мас. % (рис. 2, 3). Тогда при наплавке наблюдаются следующие особенности:

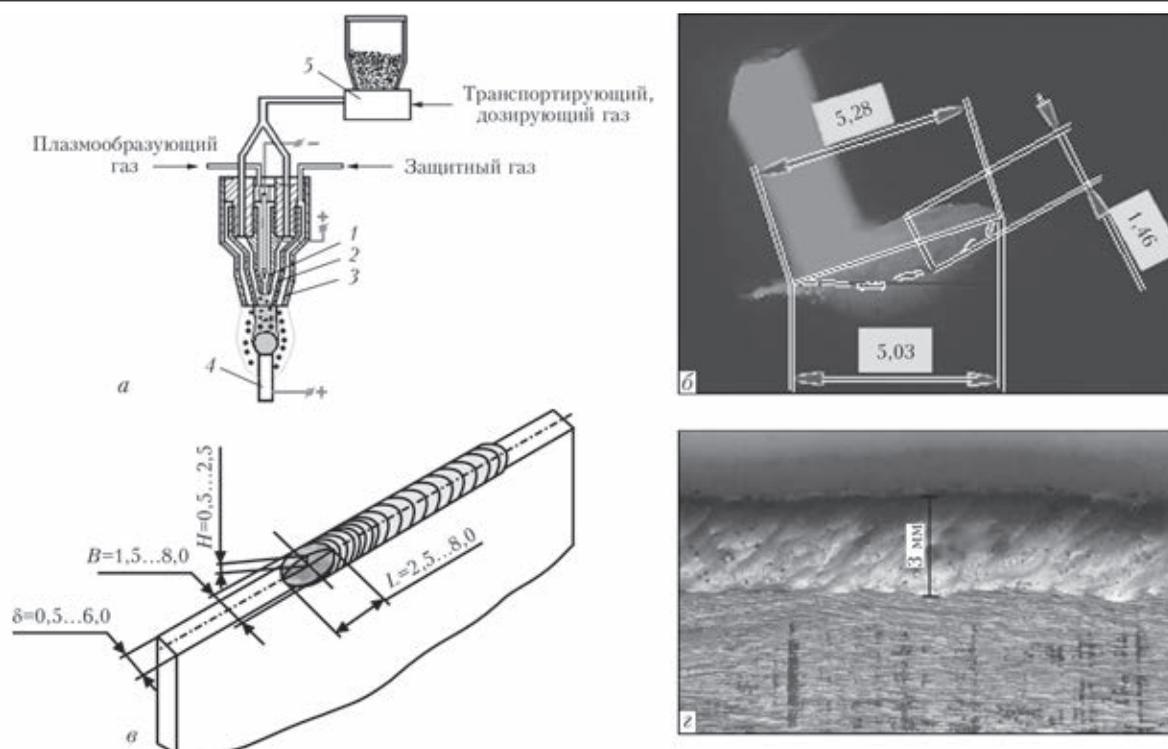


Рис. 1. Схема процесса микроплазменной порошковой наплавки (а), внешний вид сварочной ванны (б), типичные ее размеры (в), внешний вид наплавленного валика (г) (а: 1 — плазменное сопло; 2 — фокусное сопло; 3 — защитное сопло; 4 — изделие; 5 — питатель для подачи порошка)

– на большей части поверхности зеркала сварочной ванны образуется плотная оксидная пленка, которая может оставаться на поверхности валика после охлаждения;

– ширина ванны значительно превышает ширину узкой подложки<sup>1</sup> (более 1,5...2,0 мм на сторону), что усложняет последующую механическую обработку валика;

– в наплавленном металле и на границе его раздела с основным периодически формируются несплавления, оксидные включения и подрезы.

Если содержание в наплавленном металле кислорода и азота составляет соответственно более 0,045...0,060 и 0,0085...0,0090 мас. %, то из-за наличия плотных оксидных пленок нарушается непрерывное формирование наплавляемого металла (см. рис. 2).

Описанные выше отклонения от качественного формирования наплавляемых никелевых жаропрочных сплавов в той или иной мере также проявляются, если содержание кислорода и азота в дисперсной присадке превышает соответственно 0,0120 и 0,0022 мас. % (см. рис. 2, 3).

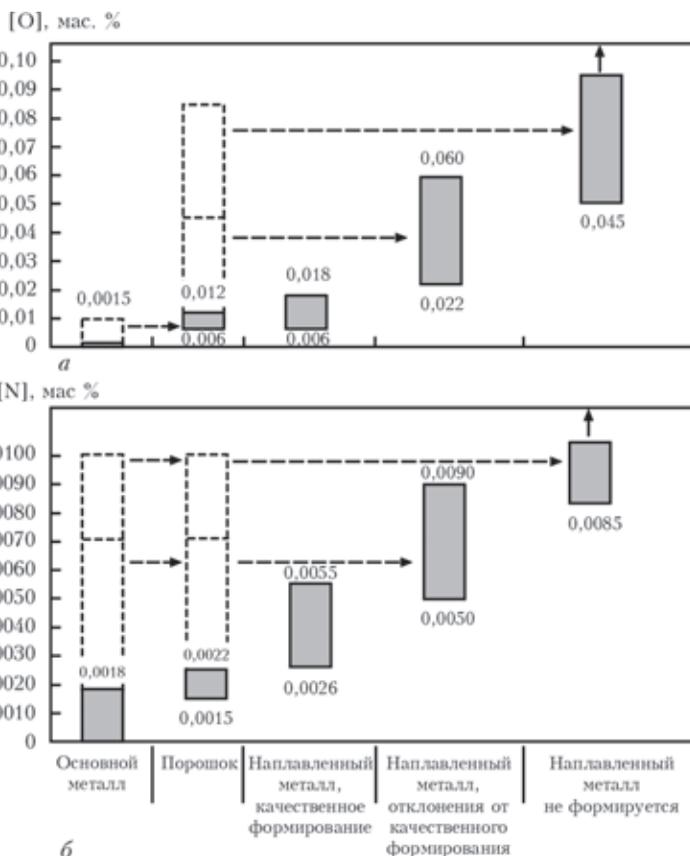


Рис. 2. Содержание кислорода (а) и азота (б) после прохождения жаропрочным сплавом технологических переделов: литая заготовка — распыленный порошок — наплавленный металл (штриховая линия — возможные отклонения от рекомендуемых диапазонов содержания активных газов в металле)

<sup>1</sup> Поверхность, ширина которой не превышает ширины сварочной ванны [16].

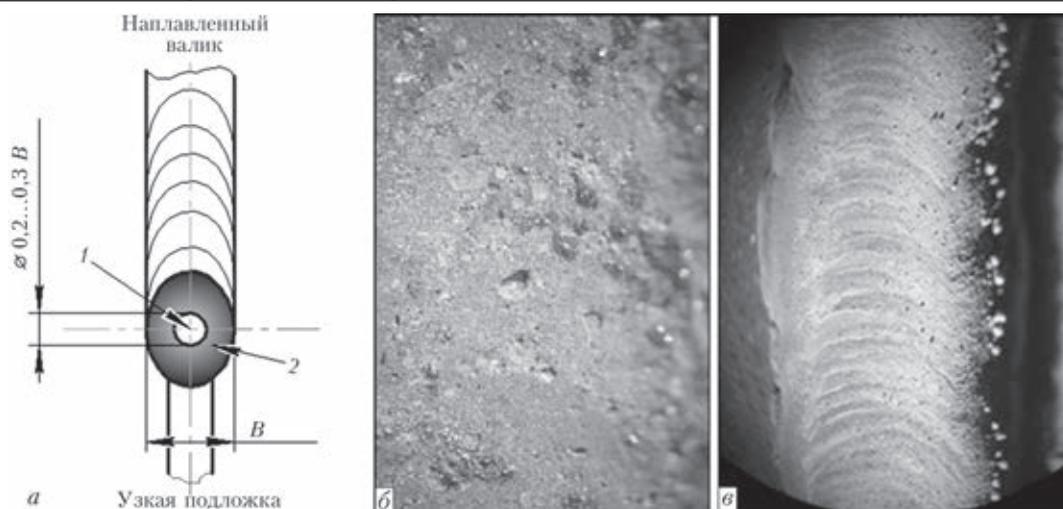


Рис. 3. Особенности формирования наплавляемого никелевого жаропрочного сплава с содержанием  $\gamma'$ -фазы более 45 об. % при повышенном содержании в нем кислорода и азота: а — сварочная ванна (1 — свободный участок зеркала сварочной ванны; 2 — периферия зеркала сварочной ванны, закрытая оксидной пленкой); б — оксидная пленка после кристаллизации валика,  $\times 25$ ; в — внешний вид валика

В свою очередь количество активных газов в порошке зависит от их содержания в исходной литой заготовке [17–20]; способа производства порошка [16]; уровня влажности порошковых материалов [9, 16]; кратности повторного использования порошка [9, 16].

Известно, что кислород и азот наряду с другими элементами являются вредными примесями в литых никелевых жаропрочных сплавах. Их содержание в современных сплавах после вакуумно-индукционной выплавки ограничивается до 0,0015 мас. % [17, 18]. Повышение содержания кислорода до 0,0017...0,0032 и азота до 0,0015...0,010 мас. % в исходных отливках может быть обусловлено введением в шихтовые материалы отходов литейного производства [17–20]. Остатки порошка после повторного использования [9, 14, 21], отходы при производстве порошка [10, 11] (дисперсный материал вне фракции 40...250 мкм), вероятно, также могут использоваться в исходной заготовке для распыления порошка и существенно могут повысить в ней содержание кислорода (ориентировочно до 0,012 мас. %). В этом случае повышенное содержание активных газов в распыленном порошке может уже само по себе вызвать некачественное формирование наплавляемого валика.

Существенное влияние на содержание кислорода и азота в дисперсной присадке может оказывать способ распыления порошка. Серийно производятся наплавочные порошки с различным распылением струи жидкого металла: водой, воздухом или азотом, аргоном под давлением; центробежным распылением. Содержание кислорода и азота в них определяется диспергирующей расплав средой и может быть достаточно высоким — соответственно 0,06...0,12 и 0,061...0,141 мас. %

[16]. Например, оценка содержания активных газов в присадочных порошках никелевого сплава IN625 ряда производителей показала, что в некоторых случаях оно может достигать 0,040...0,050 мас. % кислорода и 0,007...0,009 мас. % азота.

Ввиду высокого сродства к кислороду основных легирующих элементов в жаропрочных сплавах технология производства дисперсной присадки должна обеспечивать гарантированную защиту от воздействия активных газов на расплав. Наиболее полно перечисленным требованиям отвечает способ распыления слитка аргоном с охлаждением порошка в инертной среде [10, 11], позволяющий при ограниченном до 0,002 мас. % содержании газов в исходной заготовке получать присадочный порошок никелевых жаропрочных сплавов с содержанием кислорода до 0,0120 и азота до 0,0025 мас. %.

При микроплазменной порошковой наплавке часть присадки движется по периферии микроплазменной дуги, не попадает в сварочную ванну и может быть использована повторно [9, 14, 21]. В ходе исследований морфологии такого порошка методами оптической микроскопии (рис. 4, а) установлено, что при его многократном применении в нем накапливаются частицы с окисленной поверхностью (до 50...60 % общего количества). Анализ данных частиц с помощью электронной микроскопии показал наличие на их поверхности оксидной пленки толщиной до 3...4 мкм (рис. 4, в–г). Использование такого порошка лишь незначительно повышает содержание кислорода и азота в наплавленном металле — соответственно не более 0,003 и 0,0015 мас. % [9], что является допустимым при обеспечении качественного формирования валика, при этом содержание кислорода, азота в на-

плавленном металле не превышает соответственно 0,0180 и 0,0055 мас. %.

При металлографическом анализе в металле никелевых сплавов с содержанием  $\gamma'$ -фазы 15...62 об. %, полученном способом микроплазменной порошковой наплавки, периодически выявляются микропоры размером 5...75 мкм (преимущественно 20...40 мкм) в количестве до 20...30 шт. на площади примерно 4 мм<sup>2</sup>. В наплавленном металле наблюдается как равномерное их распределение, так и локальные вытянутые скопления микропор не зависимо от расстояния от линии сплавления (рис. 5).

На присутствие микропор в наплавленном металле не влияют вид защитного газа (аргон, аргоноводородная смесь [7]) и параметры режима предварительной просушки порошка при температуре до 300 °С. Исследования продольных сечений валиков, наплавленных преимущественно при эффективной мощности нагрева  $q_{и} = 200...500$  Вт, показали, что на площади наплавленного металла 50 мм<sup>2</sup> общая площадь микропор  $F_{ПН}$  находится в пределах 1000...70000 мкм<sup>2</sup>, а их относительная площадь  $\Pi_{ПН}$  составляет 0,002...0,14 об. %.

Появление в наплавленном металле микропор размером 5...75 мкм связывается с наличием преимущественно закрытых микропор аналогичного размера в присадочном порошке (рис. 6). Анализ с помощью электронной микроскопии поперечных сечений частиц порошка с внутренними несплошностями показал отсутствие на внешней границе микропор оксидных пленок (рис. 6, в-е). Это свидетельствует о достаточном уровне защиты от воздушной среды при распылении расплава и не противоречит описанному в работах [2, 10, 11] механизму образования микропор.

Металлографический анализ проб, отобранных из десяти партий присадочного порошка из

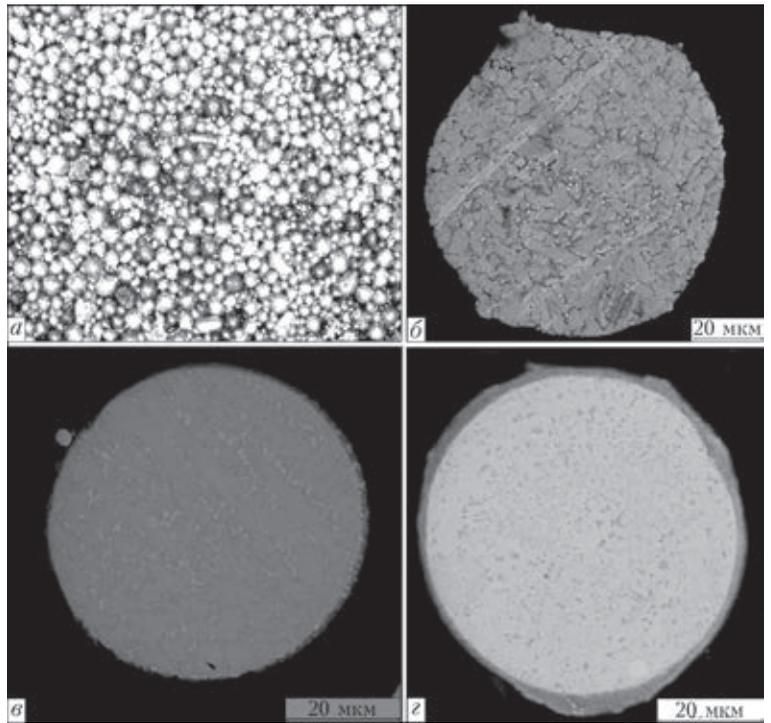


Рис. 4. Морфология и микроструктура поперечного сечения частиц порошка никелевого жаропрочного сплава: а — остаток порошка после нескольких повторных использований (более темный цвет поверхности — окисленные в микроплазменной дуге частицы,  $\times 50$ ); б — частица нового порошка из сплава ЖС6У-ВИ,  $\times 650$ ; в — частица окисленного в микроплазменной дуге порошка из сплава ЖС32-ВИ,  $\times 1000$ ; г — частица окисленного и переплавленного в микроплазменной дуге порошка из сплава ЖС32-ВИ,  $\times 1000$ )

никелевых и кобальтовых сплавов, подтвердил факт наличия в них микропор независимо от марки сплава и производителя порошка. Установлено, что содержание внутренних микропор в дисперсной присадке значительно возрастает с увеличением: количества  $\gamma'$ -фазы более 45...50 об. % в никелевом сплаве; удельной доли частиц размером более 100...125 мкм в гранулометрическом составе используемой фракции порошка. Количественные показатели микропористости для различных партий присадочного порошка из сплава ЖС32-ВИ приведены в табл. 1.

На рис. 7-9 представлено изменение количественных показателей микропористости в наплавленном металле от технологических параметров

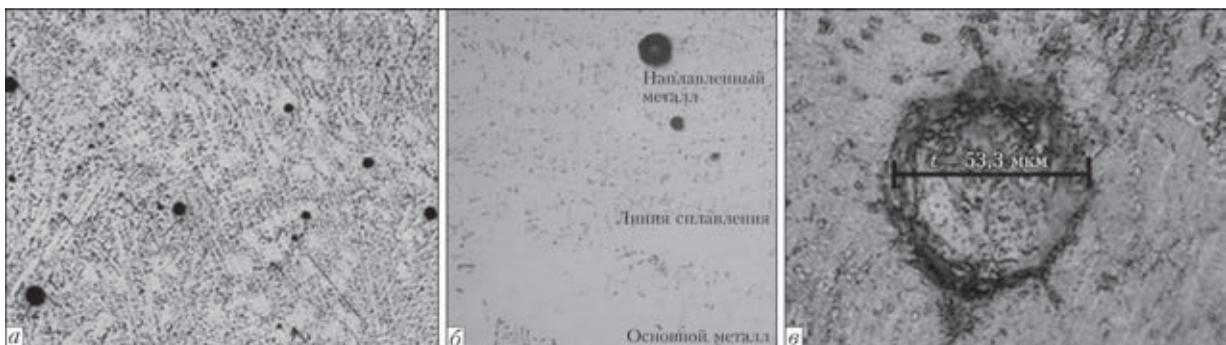


Рис. 5. Микроструктура наплавленного металла с микропорами (а,  $\times 50$ , б, 100) и единичная микропора (в) в наплавленном металле сплава ЖС32 (а, в — химическое травление; б — ионное травление)

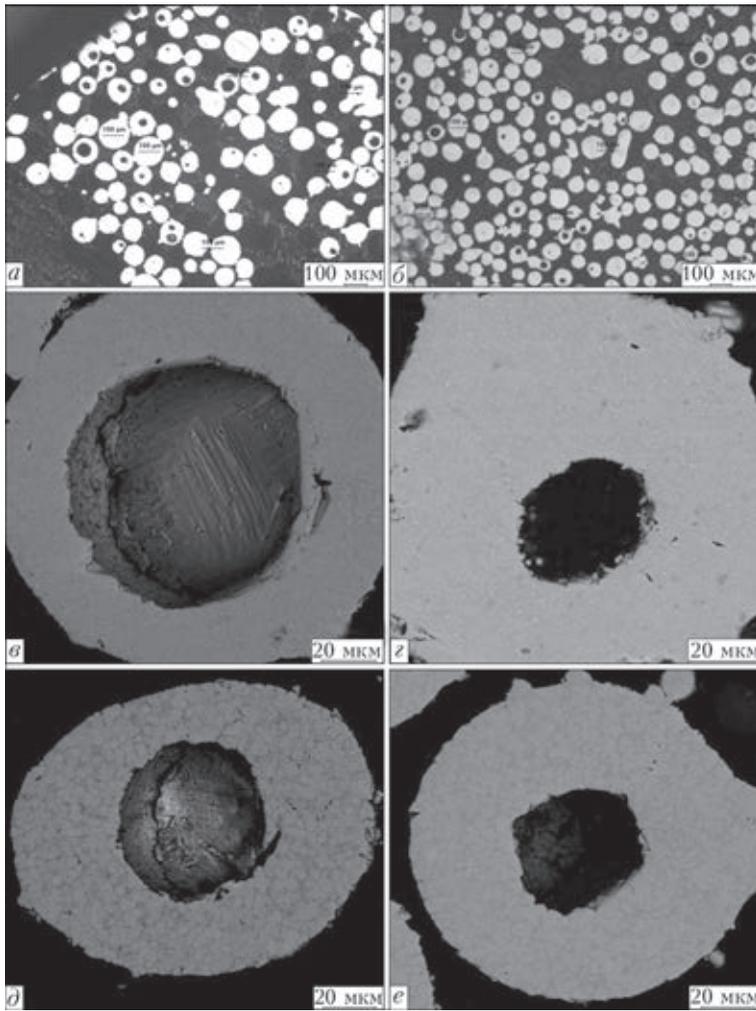


Рис. 6. Микроструктура частиц порошка никелевых жаропрочных сплавов с микропорами: а-г — порошок из сплава ЖС32-ВИ, оптическая (а, б) и электронная микроскопия (в, г); д — порошок из сплава ЖС26-ВИ; е — порошок из сплава ЖС6У-ВИ

процесса наплавки и количественных показателей микропористости присадочного порошка. Установ-

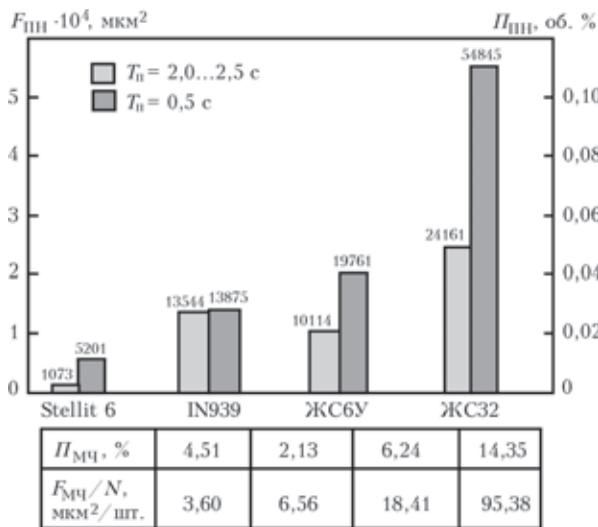


Рис. 7. Влияние показателей микропористости присадочного порошка ( $P_{Mq}$ ,  $F_{Mq}/N$ ) на показатели микропористости наплавленного металла ( $F_{III}$ ,  $P_{III}$ ) для различных сплавов (при  $I = 10...15$  А)

лено, что при микроплазменной наплавке с  $I = \text{const}$  и подачей порошка в количестве до 5 г/мин они зависят от:

- количественного содержания и размера микропор в исходной присадке, снижаясь до  $P_{III} = 0,01...0,026$  об. % при их уменьшении ( $P_{Mq} = 2,13...4,51$  % и  $F_{Mq}/N = 2,13...6,56$   $\mu\text{m}^2/\text{шт.}$ );
- величины сварочного тока, уменьшаясь до  $P_{III} = 0,03...0,06$  об. % при силе тока 45...65 А;
- сосредоточенности ввода порошка, массы вводимой микропорции порошка  $M_0 = 0,02...0,13$  г, периодичности между их вводом  $T_n = 0,5...2,5$  с.

Минимальное содержание микропор в наплавленном металле ЖС32 ( $P_{III} = 0,02...0,03$  об. %) наблюдается при уменьшении массы микропорции присадочного порошка до 0,02 г (см. рис. 9).

Для ограничения количества и размера микропор в наплавленном металле при использовании дисперсной присадки, содержащей значительное количество микропор (например,  $P_{Mq} = 13,46$  % и  $F_{Mq}/N = 48,02$   $\mu\text{m}^2/\text{шт.}$ ), следует подавать порошок малыми микропорциями ( $M_0 \approx 0,02$  г) с периодичностью более 2,5 с. В этом случае для удержания на узкой подложке сварочной ванны требуется более прецизионное дозирование тепловложений в изделие с целью уменьшения глубины проплавления основного металла. Такой принцип построения режимов существенно отличается от плазменно-порошковой наплавки [16] или сварки с дополнительной дисперсной присадкой [22], где проплавление основного металла ограничивается за счет введения в сварочную ванну значительных количеств дисперсной присадки.

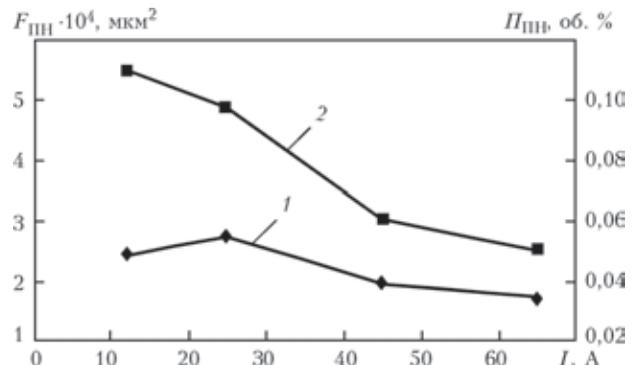


Рис. 8. Влияние силы сварочного тока  $I$  на показатели микропористости наплавленного металла ЖС32 ( $F_{III}$ ,  $P_{III}$ ) при разном периоде времени между вводом в сварочную ванну микропорций порошка массой  $M_0 = 0,12...0,14$  г: 1 —  $T_n = 2,0...2,5$  с; 2 — 0,5 с (порошок из сплава ЖС32-ВИ соответствует III партии согласно табл. 1)

Таблица 1. Характеристики микропористости присадочного порошка из сплава ЖС32-ВИ (по данным металлографического анализа)

Фракция, мкм (ГОСТ 6613–86), параметры микропористости порошка	I партия		II партия		III партия	
	$P_{MчФ}$ , %	$N_{\phi}/N$ , %	$P_{MчФ}$ , %	$N_{\phi}/N$ , %	$P_{MчФ}$ , %	$N_{\phi}/N$ , %
–63	0,19	31,66	0,73	29,74	0,65	–
63...80	-	19,92	3,71	32,09	10,66	–
80...100	-	19,73	5,02	28,94	16,07	–
100...125	-	19,19	8,44	8,02	37,03	–
125...160	-	8,51	52,17	1,96	30,10	–
$P_{Mч}$ , %	0,19	-	8,68	-	13,46	-
$F_{Mч}/N$ , мкм <sup>2</sup> /шт.	7,57	-	36,37	-	48,02	-

Примечание.  $N_{\phi}/N$  — относительное количество частиц порошка во фракции;  $P_{MчФ}$  — относительное количество частиц с микропорами во фракции.

Экспериментальные данные рис. 7–9 позволяют предположить, что образование микропор в наплавленном металле отличается от общеизвестного механизма формирования пористости в сварных швах [1]. Наиболее вероятен следующий механизм их образования. В столбе микроплазменной дуги на токах менее 35 А нагрев до температуры плавления  $T_{пл}$  большинства частиц размером 63...160 мкм маловероятен [16]. Порошок, в том числе и с внутренними микропорами, попадает в сварочную ванну в твердом агрегатном состоянии ( $T_{пор} < T_{пл}$ ). Дальнейший нагрев и плавление дисперсных частиц в сварочной ванне требует дополнительных затрат тепловой энергии, что вызывает нарушение граничного условия 3-го рода<sup>2</sup>. Запас энергии, которую можно затратить на нагрев и плавление порошка, характеризуется величиной тепловой энергии перегрева расплавленного металла ванны и временем нахождения его в жидком агрегатном состоянии. Подача дисперсной присадки снижает среднюю температуру сварочной ванны, а максимально допустимое количество ее ограничено [16, 22]. Частицу порошка внутри объема расплавленного металла можно считать «термически тонким телом»<sup>3</sup>. Время его нагрева до  $T_{пл}$  прямо пропорционально его диаметру, разнице температур  $T_{пл} - T_{пор}$  и обратно пропорционально приходящейся на его поверхность удельной тепловой энергии [23].

Распределение порошка при его вводе в сварочную ванну подчиняется нормальному закону [14], время существования ее металла в расплавленном состоянии ограничено [1]. В зависимости от количества энергии, полученной каждой частицей от перегретого металла, на момент кристаллизации в сварочной ванне возможны пять случаев (рис. 10). Три последних из них приводят к

<sup>2</sup> Количество тепловой энергии, поступившей к ее поверхности в результате конвективного и радиационного теплообмена, равно количеству энергии, отведенному за счет теплопроводности [23].

<sup>3</sup> Тела, в которых возникающий по их сечению перепад температур ничтожно мал [23].

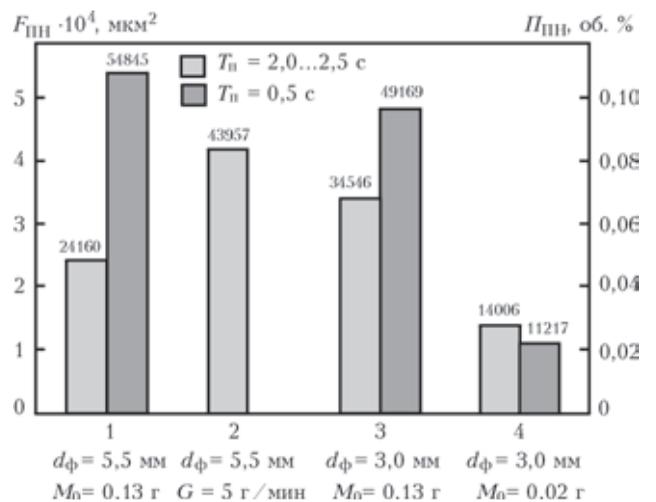


Рис. 9. Влияние параметров процесса  $d_{\phi}$ ,  $M_0$ ,  $T_{II}$ , вида подачи присадки (1, 3, 4 — порционная; 2 — непрерывная) на показатели микропористости наплавленного металла ЖС32 ( $F_{III}$ ,  $P_{III}$ ) при  $I = 10...15$  А (порошок из сплава ЖС32-ВИ соответствует III партии согласно табл. 1)

несплошностям в наплавленном металле и затем визуально фиксируются при металлографическом анализе (см. рис. 5). На сегодня неизвестно, какой процесс доминирует при образовании микропор в наплавленном металле на момент его кристаллизации в сварочной ванне:

- частица с внутренней микропорой не успевает нагреться до  $T_{пл}$  и расплавиться;
- высвободившийся из внутренней несплошности частицы присадки пузырек газа не успевает всплыть на поверхность и формирует микропору.

Образование пористости по механизму, отличному от общеизвестного [1], также встречается при лазерной сварке аустенитных нержавеющей сталей [24].

Исходя из установленной взаимосвязи между микропористостью в присадочном порошке и в наплавленном металле актуальны следующие задачи:

- разработка простых и достоверных методов количественного контроля внутренних несплошностей в присадочных порошках для микроплазменной порошковой наплавки;

Таблица 2. Характеристики микропористости присадочного порошка из сплава ЖС32-ВИ (по данным гидростатического взвешивания)

Параметр	I партия	II партия	III партия
Пикнометрическая плотность порошка $\rho_n$ , г/см <sup>3</sup>	8,4890 <sup>+0,1435</sup> <sub>-0,1629</sub>	8,3581 <sup>+0,1285</sup> <sub>-0,1394</sub>	8,1547 <sup>+0,4645</sup> <sub>-0,3162</sub>
Пористость $\rho$ , %	3,097 <sup>-1,3974</sup> <sub>+2,0037</sub>	4,5881 <sup>-1,5910</sup> <sub>+1,4677</sub>	6,9098 <sup>-5,3025</sup> <sub>+3,6097</sub>
Плотность $\rho_{\text{в}}$ сплава по [25], г/см <sup>3</sup>	8,76		
Плотность сплава $\rho$ , г/см <sup>3</sup> (взвешивание шлифованной пластины 75×45×3,5 мм)	8,79		

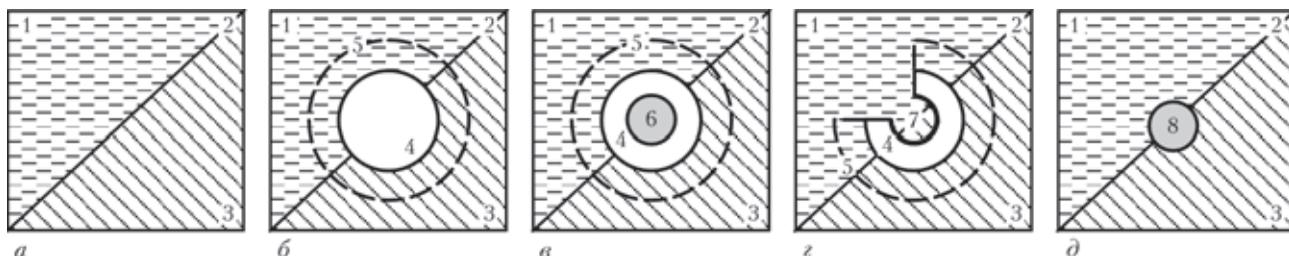


Рис. 10. Схемы возможных состояний частиц порошка на момент кристаллизации сварочной ванны: а, д — полностью расплавлена; б — частица без микропоры не расплавлена; в, г — частица с микропорой не расплавлена; 1 — расплавленный металл; 2 — фронт кристаллизации; 3 — закристаллизовавшийся металл; 4 — частица порошка; 5 — возможная область локального переохлаждения расплавленного металла и дальнейшей локальной кристаллизации от поверхности частицы; 6 — закрытая микропора в частице; 7 — открытая микропора в частице; 8 — пузырек газа, вышедший из расплавленной частицы с закрытой микропорой

– оптимизация технологии распыления расплава при производстве порошков никелевых сплавов, содержащих более 45 об. %  $\gamma'$ -фазы.

Перспективными методиками контроля дисперсной присадки могут быть: металлографический анализ поперечных сечений частиц порошка, определяющий площадь, количество и параметры статистического распределения микропор в зависимости от размера частиц; оценка пикнометрической плотности и пористости порошка гидростатическим взвешиванием.

Предварительная оценка пикнометрической плотности порошка из сплава ЖС32-ВИ показала, что для дисперсной присадки с меньшим количеством пористых частиц ее среднее значение отличается не более чем на 4,6 % от плотности материала сплава (табл. 2).

Исходя из известных особенностей металлургии никелевых жаропрочных сплавов при вакуумно-индукционной выплавке [17, 19], дополнительное влияние на склонность к образованию микропор при изготовлении соответствующих порошков может оказывать повышенное содержание кислорода, азота в исходной заготовке или шихте. Во-первых, в процессе диспергирования расплавленного металла вероятно протекание реакции взаимодействия кислорода с углеродом (содержание до 0,15...0,18 мас. %) с выделением его газообразного оксида или диоксида [17]. Во-вторых, при повышенном содержании азота 0,0024...0,0050 мас. % проявляется склонность литых никелевых сплавов с монокристаллической структурой к образованию микропористости [19].

### Выводы

1. Качественное формирование наплавляемого металла при микроплазменной порошковой наплавке на узкую подложку из никелевых жаропрочных сплавов обеспечивается ограничением в нем кислорода менее 0,0180 и азота до 0,0055 мас. %.

2. Показано, что содержание активных газов в никелевом жаропрочном сплаве постепенно увеличивается в процессе его прохождения по технологическим переделам: литая заготовка или шихта–распыленный порошок–наплавленный металл. Необходимо контролировать и ограничивать их содержание после первых двух этапов передела таким образом, чтобы затем количество кислорода и азота в наплавленном металле не превышало 0,0180 и 0,0055 мас. % соответственно.

3. Целесообразно в присадочных порошках для микроплазменной порошковой наплавки содержание кислорода иметь не более 0,012 мас. %, азота не более 0,0025 мас. %. При содержании газов в исходной заготовке или шихте до 0,002 мас. % это достигается при распылении слитка аргоном.

4. Появление микропор размером 5...75 мкм в наплавленном металле связывается с наличием внутренних микропор аналогичного размера в присадочном порошке. Установлено, что микропористость наплавленного металла зависит от содержания микропор в исходном порошке, силы сварочного тока, массы микропорции присадки, сосредоточенности и частоты ее ввода в сварочную ванну. Минимальный уровень микропористости в наплавленном металле ЖС32 (0,02...0,03 об. % в продольном сечении валика) наблюдается при

снижении массы микропорции подаваемого присадочного порошка до 0,02 г.

5. Наиболее вероятен перенос микропоры в составе дисперсной присадки через микроплазменную дугу в сварочную ванну. Там на момент кристаллизации ее металла частица с микропорой либо не успевает расплавиться, либо после ее плавления пузырек газа не успевает всплыть на поверхность ванны.

6. Необходим входной контроль партий присадочных порошков никелевых жаропрочных сплавов на содержание микропор в его частицах. Перспективными методиками контроля являются оценка пикнометрической плотности дисперсного материала и статистический металлографический анализ. Установлено, что средняя пикнометрическая плотность присадочных порошков с меньшим содержанием микропор имеет отклонение от плотности материала сплава не более 4,6 %.

1. *Технология* электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. акад. Б. Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1974. – 768 с.
2. *Симс Ч., Столлов Н., Хагель В.* Суперсплавы II / Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок / Пер. с англ. под ред. Р. Е. Шалина. – М.: Металлургия, 1995. – 384 с.
3. *Цинке М., Нойберт Г., Герольд Х.* Свойства сварных соединений жаропрочных сплавов на основе никеля // Автомат. сварка. – 1999. – № 4. – С. 35–38.
4. *Сорокин Л. И.* Заварка трещин с окисленной поверхностью на жаропрочных никелевых сплавах // Свароч. пр-во. – 2004. – № 12. – С. 30–31.
5. *Сорокин Л. И., Лукин В. И., Багдасаров Ю. С.* Свариваемость литейных жаропрочных сплавов типа ЖС6 // Там же. – 1997. – № 6. – С. 12–17.
6. *Сорокин Л. И.* Напряжения и трещины при сварке и термической обработке жаропрочных никелевых сплавов // Там же. – 1999. – № 12. – С. 11–17.
7. *Разработка* технологии восстановления торцов бандажных полок рабочих лопаток ТВД авиационного двигателя Д18Т методом микроплазменной порошковой наплавки / К. А. Ющенко, В. С. Савченко, А. В. Яровицын и др. // Автомат. сварка. – 2010. – № 8. – С. 25–29.
8. *Технологический семинар Deloro Stellite в Запорожье* // Там же. – 2010. – № 1. – С. 59–62.
9. *Ющенко К. А., Яровицын А. В., Звягинцева А. В.* Свойства соединений жаропрочных никелевых сплавов, вы-
- полненных микроплазменной порошковой сваркой // Там же. – 2008. – № 9. – С. 5–9.
10. *Терновой Ю. Ф., Кудиевский С. С., Пашетнева Н. Н.* Инженерные расчеты процессов распыления расплавленных Металлов. – Запорожье: Изд-во Запорож. Гос. инж. акад., 2005. – 149 с.
11. *Терновой Ю. Ф., Баглюк С. А., Кудиевский С. С.* Теоретические основы распыления металлических расплавов. – Запорожье: Изд-во Запорож. гос. инж. акад., 2008. – 298 с.
12. *Федоренко Г. А., Шведиков В. М., Грищенко Л. В.* О достоверности методов исследования струйной защиты // Свароч. пр-во. – 1986. – № 6. – С. 35–37.
13. *ГОСТ 17745–90.* Стали и сплавы. Методы определения газов. – Введ. 01.07.1991.
14. *Некоторые* пути снижения потерь присадочного порошка при микроплазменной порошковой наплавке / К. А. Ющенко, А. В. Яровицын, Д. Б. Яковчук и др. // Автомат. сварка. – 2013. – № 9. – С. 32–38.
15. *Диагностика* металлических порошков / В. Я. Буланов, Л. И. Кватер, Т. В. Долгаль и др. – М.: Наука, 1983. – 280 с.
16. *Гладкий П. В., Переплетчиков Е. Ф., Рябцев И. А.* Плазменная наплавка. – Киев: ЕкоТехнологія, 2007. – 292 с.
17. *Каблов Е. Н.* Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия). – М.: МИСИС, 2001. – 632 с.
18. *Строганов Г. Б., Чепкин В. М.* Литейные жаропрочные сплавы для газовых турбин. – М.: ОНТИ МАТИ, 2000. – 128 с.
19. *Каблов Д. Е., Сидоров В. В.* Азот в монокристаллических жаропрочных сплавах // Наука и образование. – 2012. – № 2, 77-30569/339556 (электрон. изд.).
20. *Улучшение* структуры и свойств никелевого жаропрочного сплава ЗМИЗУ-ВИ / Лысенко Н. А., А. А. Педаш, А. Г. Коломойцев, Э. И. Цвирко // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. Вісн. Запоріж. держ. техн. ун-ту. – 2005. – № 2. – С. 34–39.
21. *Особенности* малоамперной аргонодуговой и микроплазменной порошковой наплавки на узкую подложку / А. В. Яровицын, К. А. Ющенко, А. А. Наконечный, И. А. Петрик // Автомат. сварка. – 2009. – № 6. – С. 37–42.
22. *Ивочкин И. И., Малышев Б. Д.* Сварка под флюсом с дополнительной присадкой. – М.: Стройиздат, 1981. – 175 с.
23. *Лыков А. В.* Теория теплопроводности. – М.: Высш. шк., 1967. – 600 с.
24. *Катаяма С.* Механизм образования различных дефектов при лазерной сварке и способы их предупреждения // Журн. Япон. Свароч. об-ва. – 2001. – 19, N 1. – С. 213–218 [Пер. с яп. яз., ИЭС им. Е.О. Патона].
25. *К вопросу* о выборе новых жаропрочных никелевых сплавов для перспективных авиационных ГТД / Н. А. Шарова, Е. А. Тихомирова, А. Л. Барабаш и др. // Вест. Самар. гос. аэрокосм. ун-та. – 2009. – № 3. – С. 249–255.

Поступила в редакцию 30.04.2014