



УДК 669.187.58

## ПОЛУЧЕНИЕ БЫСТРОЗАКАЛЕННЫХ СПЛАВОВ ПРИ ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОМ ПЛАВЛЕНИИ

Ю. А. Никитенко

Рассмотрены особенности конструкции плазменно-дугового плавильного модуля, предназначенного для получения быстро закаленных сплавов способом спиннингования. Исследовано тепловое состояние отдельных узлов оборудования в процессе плавки и сверхбыстрой закалки. На примере сплава системы Ni-Si-B определены технологические параметры получения ленты с аморфной структурой толщиной от 30 до 100 мкм, качество которой подтверждено металлографическими анализами.

Peculiar features of design of plasma-arc melting module designed for producing rapidly-hardened alloys by a spinning method are considered. The hot state of separate components of equipment was investigated in the process of melting and super-rapid hardening. On the example of alloy Ni-Si-B, the technological parameters of producing strip with amorphous structure of thickness from 30 up to 100 mm, whose quality was confirmed by metallographic analyses, were determined.

**Ключевые слова:** плазменно-дуговая плавка; сверхбыстрая закалка; спиннингование; тепловое состояние; сплавы с аморфной структурой и микрокристаллические

Для повышения надежности и долговечности приборов, машин и механизмов необходимо применение новых материалов с высоким уровнем функциональных свойств. Сплавы с кристаллической структурой, широко используемые в качестве конструкционных материалов, не всегда могут обеспечить в полной мере высокий уровень эксплуатационных свойств. В связи с этим в течение последних лет отмечен возрастающий интерес к проблеме получения и применения аморфных и микрокристаллических металлических материалов, свойства которых существенно отличаются от таковых тех же сплавов, полученных по стандартной технологии [1].

Наиболее распространенным способом получения аморфных и микрокристаллических структур является сверхбыстрая закалка расплава. Для плавления и накопления расплава в существующих технологиях используют керамические тигли, изготовленные из огнеупорных материалов, например кварца, что позволяет получать широкую гамму быстро закаленных сплавов.

Однако при плавке высокорекреакционных сплавов непосредственный контакт керамики с расплавом приводит к химическому взаимодействию и разрушению тигля. Кроме того, сверхбыстрая закалка сплавов с повышенной температурой плавления осложняется размягчением огнеупора, потерей жесткости конструкции и, как следствие, дестабилизацией процесса. Поэтому получение быстро закаленных сплавов из высокорекреакционных и тугоплавких

сплавов с использованием существующих технологий практически невозможно.

Решением данной проблемы может послужить создание технологических схем сверхбыстрой закалки, которые позволят избежать контакта керамики с расплавом и на протяжении длительного времени выдерживать высокие температуры. Основой для этого может служить плавка в водоохлаждаемом тигле с мощным источником нагрева.

В данном случае наиболее пригодным видом плавки, который можно эффективно применять, является плазменно-дуговая плавка (ПДП) в гарнисажном тигле. Проблемы могут быть решены за счет использования медного водоохлаждаемого тигля, обеспечивающего жесткость конструкции, и его инертности к расплаву.

Для разработки технологии использовали многолетний опыт Института электросварки им. Е. О. Патона НАНУ по применению в металлургии ПДП в гарнисажном тигле, который используется в специальной электрометаллургии при переплаве высокорекреакционных и тугоплавких металлов и сплавов, титана, вольфрама, сплавов с повышенным содержанием азота и других.

В институте создали лабораторное оборудование для сверхбыстрой закалки расплава при ПДП. Внешний вид и схема установки представлены на рис. 1 [2]. Плавильная камера 10, оснащена смотровой системой и технологическим люком для загрузки шихты. В нижней части камеры размещен медный водоохлаждаемый тигель 9, в центре которого установлено сменное сливное сопло 1 из огнеупорного материала. Плавильная камера монтиру-

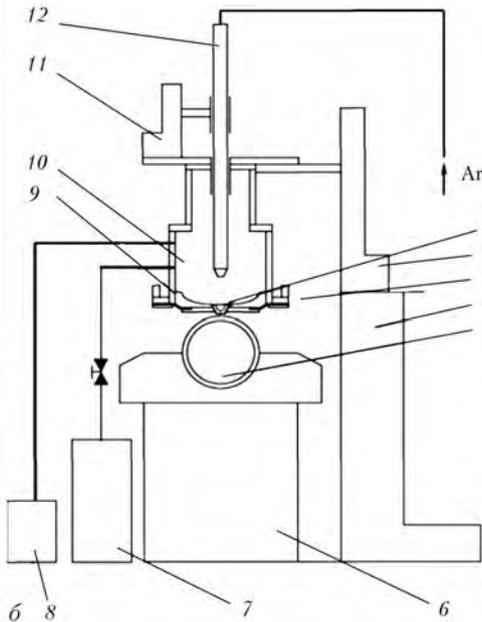


Рис. 1. Внешний вид (а) и схема (б) плазменно-дуговой установки ОП-133

ется на колонне 4, которая перемещается механизмом на колонне 2, в верхней части плавильной камеры устанавливается плазматрон прямого действия постоянного тока 12, снабженный механизмом перемещения 11. На станине 6 размещен барабан-холодильник 5 с приводом вращения и механизмом продольного перемещения. Для установления параллельности между срезом сливного сопла и поверхностью барабана-холодильника камера оснащена механизмом тонкой настройки 3. Установка подключена к системе газоснабжения, также установлены дополнительный ресивер 7 объемом 1,35 м<sup>3</sup> и вакуумная система с механическим насосом 8.

**Технические характеристики установки ОП-133**

Объем тигля, л	0,5
Скорость вращения барабана, об/мин	50... 3000
Толщина ленты, мкм	10... 100
Количество плазматронов, шт	1
Расход плазмообразующего газа, м <sup>3</sup> /ч	0,5
Максимальный рабочий ток, А	1000

Медный водоохлаждаемый тигель выполнен в форме перевернутого усеченного конуса, что позволяет обеспечить жесткость конструкции и накопление достаточного объема расплава (рис. 2, а). Для поддержания оптимального объема жидкого металла и обеспечения необходимого перегрева всего расплава коэффициент формы тигля равнялся 0,4 (отношение глубины к среднему диаметру).

Как указывалось ранее, слив осуществляется через керамическое сопло. Применение сменного керамического сопла не устранило проблему контакта расплавленного металла с керамикой, но позволило значительно сократить площадь контакта с расплавом.

Небольшие размеры и значительная толщина стенки сопла также дали возможность использовать стандартные огнеупоры при более высоких температурах.

В качестве материала сопла можно использовать различные виды керамик и композитов в зависимости от состава сплава для получения быстрозакаленных лент. В наших экспериментах использовали сопло, выполненное из прессованной кварцевой керамики «керсил» (рис. 2, б), для сплава Cu-P — из графита. «Керсил» показал хорошую стойкость и жесткость во всем температурном диапазоне вплоть до 1400 °С.

**Техническая характеристика кварцевой керамики «керсил»**

Прочность на изгиб, МПа	15... 45
Плотность кажущаяся, г/см <sup>3</sup>	1,9... 2,0
Открытая пористость, %	5... 15
КЛТР, 1/°С	5,8·10 <sup>-7</sup>
Термостойкость к перепаду температур, °С	20... 1300
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	0,7... 1,0

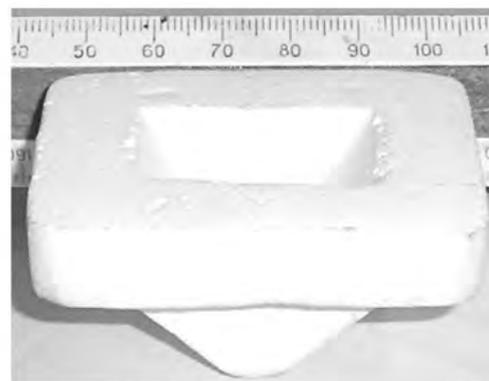
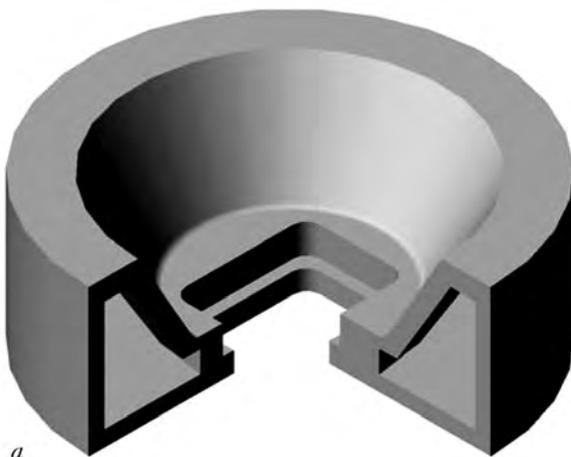


Рис. 2. Медный водоохлаждаемый тигель (а) и сменное керамическое сопло (б)



Размеры и свойства материалов барабана-холодильника				
Материал	Диаметр, мм	Ширина, мм	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·С)	Твердость НВ, МПа
Медь	350	71	400	370... 420
—"	315	67	400	370... 420
—"	300	80	400	370... 420
—"	260	65	400	370... 420
Сталь 45	300	47	47	800... 900

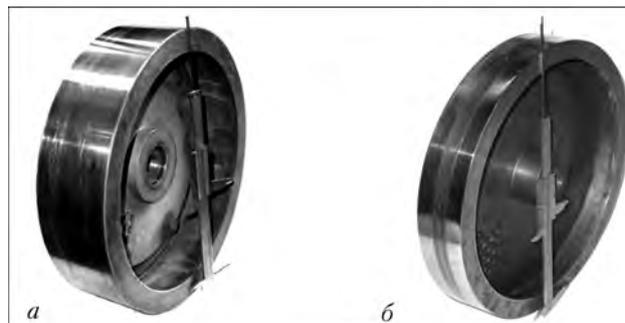


Рис. 3. Внешний вид барабанов-холодильников, изготовленных из меди (а) и стали 45 (б)

Установка оборудована сменными барабанами-холодильниками различных диаметров, изготовленными из разных материалов (таблица). Барабан представляет собой полый цилиндр, внутрь которого заливается вода и удерживается там за счет центробежной силы при вращении. В данной работе эксперименты проводили с использованием медного и стального барабанов диаметром 300 мм (рис. 3).

Расплавление шихты и дальнейшая плавка происходят в герметичной камере в аргоне. Для упрощения процесса исследования представленной технологии слив расплава осуществляли на вращающийся барабан, который находился снаружи камеры, т. е. на воздухе (рис. 4). При необходимости закалки высокорекреакционных сплавов барабан-холодильник также может быть помещен в камеру с контролируемой атмосферой. Исследования проводили на модельных сплавах, отличающихся сравнительно низкой температурой плавления, инертных к окружающей атмосфере, мас. %: Ni — основа; 7 Si; 3,5 В; 1 Cr; 0,5 Fe; Fe — основа; 19 Cr; 11 Ni; 9 В; Cu — основа; 9 — Р.

Исследование теплового состояния плавильной камеры показало, что с увеличением мощности плазматрона в диапазоне 20... 40 кВт зафиксировано повышение эффективного КПД процесса переплава. Последующее увеличение мощности плазматрона ( $W > 40$  кВт) практически не отражается на эффективном КПД и потерях теплоты в плаз-



Рис. 4. Фотография слива расплава на барабан-холодильник: 1 — барабан-холодильник; 2 — лента; 3 — защитный чехол; 4 — фторопластовый «нож»

мотрне и плавильной камере установки. Однако при мощности плазматрона более 50 кВт отмечена тенденция к снижению эффективного КПД процесса плавки при незначительном увеличении потерь в плазматроне и камере. Расчет, выполненный на базе экспериментальных данных, позволил определить удельный расход электроэнергии (4... 6 кВт·ч/кг). Тепловой КПД плазматрона составил 86... 88 %, эффективный КПД процесса — 44... 45 % [3].

Плазменная дуга является достаточно мощным и концентрированным источником нагрева, поэтому в расплаве существует температурный градиент по высоте ванны, умение управлять которым позволит контролировать и прогнозировать процесс плавки и спиннингования. Измерения температуры расплава при плазменно-дуговой плавке показали, что перегрев

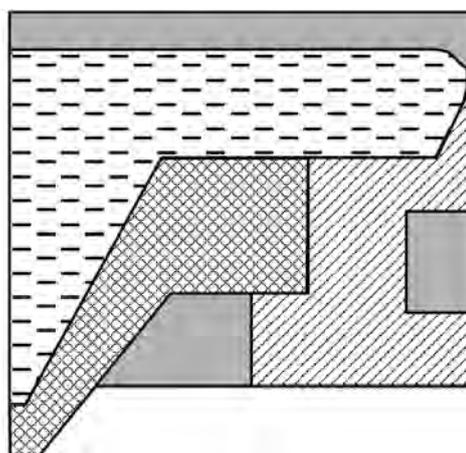
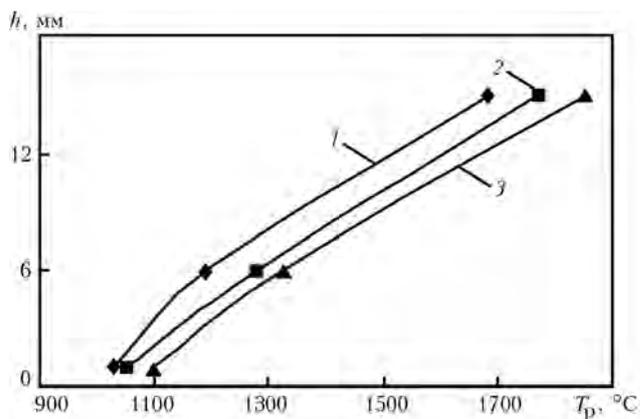


Рис. 5. Распределение температуры расплава Ni-Si-B по высоте  $h$  ванны (а) в зависимости от мощности плазменной дуги, кВт: 1 — 12,3; 2 — 19,5; 3 — 33,3; б — сечение плавильного тигля

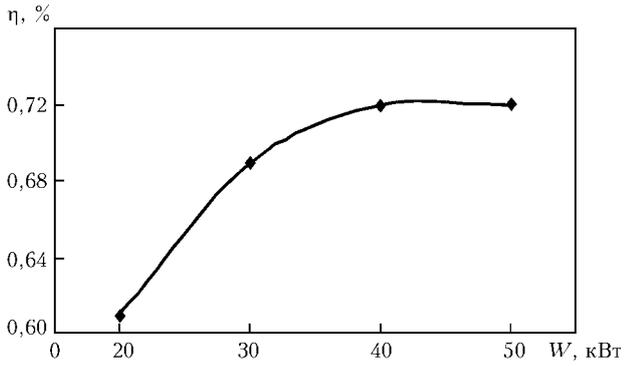


Рис. 6. Коэффициент  $\eta$  слива металла в зависимости от мощности  $W$  плазмотрона

верхних слоев ванны может достигать 500 °С относительно температуры возле сливной щели (рис. 5). Коэффициент слива расплава из гарнисажного тигля в зависимости от мощности плазменной дуги приведен на рис. 6. Максимальное его значение (около 0,72) зафиксировано при мощности около 40 кВт.

Последующее увеличение мощности не приводит к изменению объема ванны и слившегося металла, что объясняется перераспределением тепла в других элементах плавильной камеры.

Представляет интерес исследование тепловой нагрузки на керамическое сопло в процессе разлива расплава. Измерена температура сопла непосредственно возле сливной щели в процессе спиннингования и сверхбыстрой заковки (рис. 7) [4].

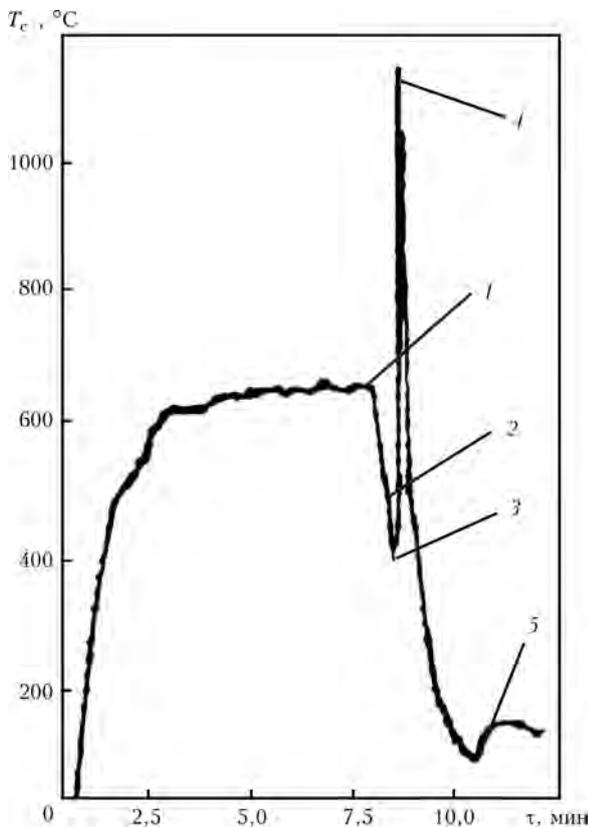


Рис. 7. Изменение температуры сливного сопла в процессе спиннингования сплава Ni-Si-B: 1 – подвод барабана-холодильника; 2 – корректировка зазора; 3, 4 – начало и окончание слива, отключение плазмотрона; 5 – отвод барабана-холодильника

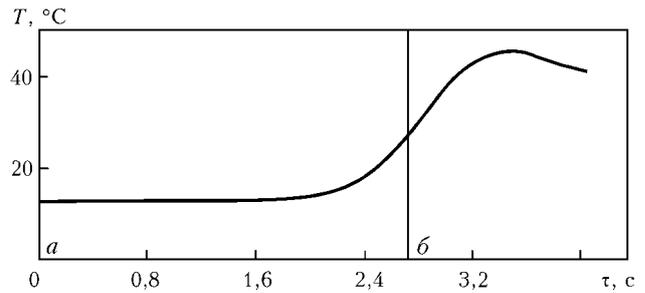


Рис. 8. Изменение температуры внутренней стенки медного барабана-холодильника в процессе спиннингования сплава Ni-Si-B: а – начало; б – окончание слива

Как видно из графика, стабилизация температуры наступает через 5...6 мин после включения плазмотрона и выхода на оптимальный технологический режим.

Дальнейшая выдержка режимов плавки не имеет смысла, поскольку видимых температурных изменений уже не происходит, и система приближается к стационарному состоянию.

При выходе на заданный стабильный режим осуществляется подведение вращающегося барабана-холодильника под сливное сопло с заданным зазором. В этот момент перекрывается магистраль сброса газа из камеры плавления, и из ресивера подается газ (аргон) с избыточным давлением.

При подводе вращающегося барабана в короткий промежуток времени охлаждается выступающая часть сопла в результате обдува потоком воздуха, увлекаемого при вращении. На рис. 7, 3 виден резкий спад температуры, составляющий 300...350 °С. Однако из-за большой скоротечности процесса и малой теплопроводности керамики это не успевает значи-

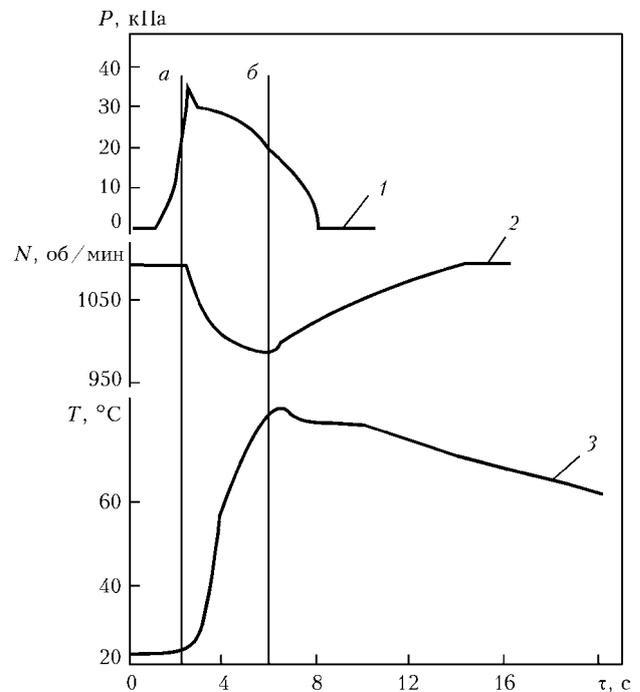


Рис. 9. Изменение технологических параметров в процессе спиннингования сплава Cu-P: 1 – избыточное давление в камере; 2 – количество оборотов барабана; 3 – температура внутренней поверхности стального барабана-холодильника: а – начало слива расплава; б – окончание

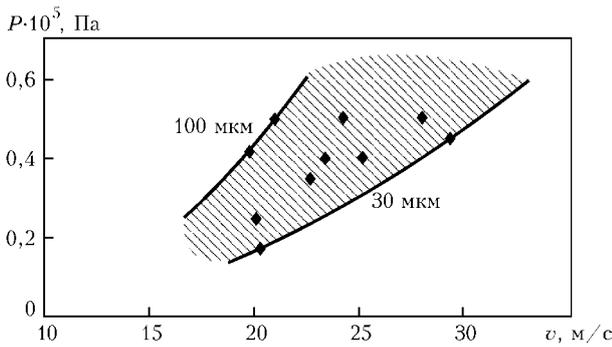


Рис. 10. Область значений линейной скорости  $v$  барабана и избыточного давления  $P$ , которое обеспечивает получение лент с аморфной структурой

тельно повлиять на температуру расплава. При дальнейшем истечении расплава в щель подаются новые перегретые объемы металла, и сопло разогрывается, что соответствует резкому подъему температуры с общим перепадом примерно  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Слив осуществляется за несколько секунд.

Главным узлом оборудования для получения сплавов с аморфной структурой является барабан-холодильник, поэтому дальнейшие исследования направили на определение его теплового состояния в процессе сверхбыстрой закалки.

Для этого разработали методику и приспособление для контактного измерения температуры вращающегося барабана с внутренней стороны контактной поверхности при закалке сплава Ni-Si-B (рис. 8) [5].

При спиннинговании сплава медь-фосфор на стальной барабан получены общие зависимости изменения давления в камере, скорости вращения барабана и температуры внутренней поверхности диска (рис. 9).

Поскольку сплав медь-фосфор в расплавленном состоянии является жидкотекучим, то слив осуществляется при небольшом избыточном давлении в камере. Минимизация расстояния между сливным соплом и барабаном-холодильником в пределах  $0,6 \dots 0,2$  мм приводит к тому, что при резком изменении вязкости расплава из-за быстрого затвердевания возникают некоторые нагрузки, препятствующие свободному движению барабана и вызывающие его кратковременное торможение.

На основе натурных экспериментов создали математическую модель, позволяющую описать процесс распространения тепла в теле барабана и определить пути дальнейшего усовершенствования его формы [6].

В результате проведенных исследований определены оптимальные технологические параметры процесса плавки и разлива расплава, получены образцы быстрозакаленных лент, имеющих как полностью аморфную структуру (Ni-Si-B) (рис. 10, 11) [7], так и микрокристаллическую (Fe-Cr-Ni-B, Cu-P).

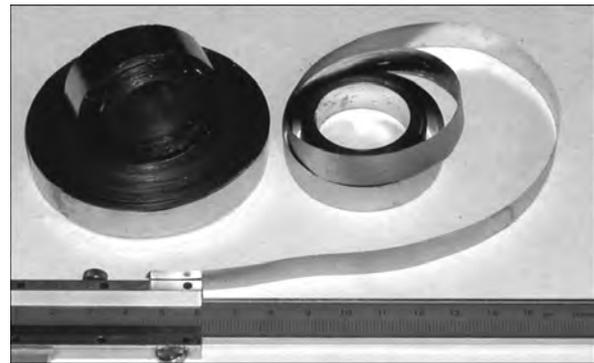


Рис. 11. Быстрозакаленная лента с аморфной структурой шириной 15 мм, толщиной 50 мкм Ni-Si-B

В ходе металлографических исследований изучены структура аморфного сплава Ni-Si-B и влияние отжига на формирование нанокристаллов. Обнаружено неоднородное распределение нанокристаллов в приповерхностном слое и уменьшение их количества и размеров от поверхности в глубь ленты [8, 9].

Результаты научных исследований позволяют рекомендовать разработанную технологию для получения высокорекреакционных и тугоплавких сплавов с аморфной структурой и микрокристаллических.

1. Молотилов Б. В. Аморфные и нанокристаллические сплавы — перспективы и проблемы // *Сталь*. — 2001. — № 1. — С. 79–83.
2. Плазменно-дуговое плавильное устройство для получения аморфных и нанокристаллических материалов методом спиннингования // В. А. Шаповалов, Г. Ф. Торхов, Ю. А. Никитенко, В. Р. Бурнашев // *Вестник Восточно-укр. нац. ун-та им. В. Даля*. — 2003. — № 11. — С. 80–88.
3. Плазменно-дуговая установка ОП-133 для получения аморфных лент методом спиннингования и ее тепловой баланс // М. Л. Жадкевич, В. А. Шаповалов, Г. Ф. Торхов и др. // *Донбас. гос. машиностр. акад.* — 2006. — № 1. — С. 160–163.
4. Исследование технологических параметров плазменно-дугового нагрева при плавке и спиннинговании расплава // М. Л. Жадкевич, В. А. Шаповалов, Г. Ф. Торхов и др. // *Современ. электротехнология*. — 2005. — № 1. — С. 26–29.
5. Измерение температуры барабана-холодильника в процессе сверхбыстрой закалки металла, расплавляемого в плазменной печи // В. А. Шаповалов, Ю. А. Никитенко, В. Р. Бурнашев, Г. Ф. Торхов // *Там же*. — 2007. — № 4. — С. 27–29.
6. Шаповалов В. А., Никитенко Ю. А., Мельник А. С. Тепловое состояние барабана-холодильника плазменно-дуговой установки в процессе сверхбыстрой закалки // *Там же*. — 2008. — № 3. — С. 42–46.
7. Никитенко Ю. О. Швидкозагартований метал, отриманий при плазмово-дуговому нагріві і спінингуванні та його структура // *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*. — 2006. — 4, вип. 4. — С. 797–801.
8. Изменение структуры при отжиге быстрозакаленного сплава плазменно-дуговой выплавки // Г. Н. Кожемякин, Н. Н. Луговой, В. А. Шаповалов и др. // *Современ. электротехнология*. — 2008. — № 4. — С. 48–49.
9. Influence of annealing on nanocrystal formation in Ni amorphous alloy // G. N. Kozhemyakin, V. A. Shapovalov, Yu. A. Nikitenko et al. // *Crystallography reports*. — 2009. — 54, № 7. — P. 142–144.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 03.04.2010