



2. Продemonстрировано, что основным преимуществом установки является возможность переплава недробленых блоков губчатого титана, способствующего исключению трудоемкой операции дробления и сортировки губки, вовлечению в переплав слоев губки низких сортов, что значительно снижает стоимость ЭЛПЕ титановых слитков. Благодаря возможности оперативной замены технологической оснастки можно выплавлять слитки как круглого, так и прямоугольного сечений из сплавов на основе железа, никеля, титана и тугоплавких металлов.

1. *Электронно-лучевая плавка* / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Д. А. Козлитин и др. — Киев: Наук. думка, 1997. — 265 с.
2. *Полуфабрикаты из титановых сплавов* / Н. Ф. Аношкин, М. З. Ерманык, Г. Д. Агарков и др. — М.: Металлургия, 1979. — 512 с.
3. Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Ахонин С. В. Получение титановых слитков из недробленых блоков губчатого титана

способом электронно-лучевой плавки // Титан. — 2005. — № 2. — С. 23–26.

4. Жук Г. В., Березос В. А., Тригуб Н. П. Прогнозирование структуры титановых слитков-слябов, получаемых способом ЭЛПЕ // Современ. электрометаллургия. — 2005. — № 3. — С. 28–31.
5. Ахонин С. В. Математическое моделирование процесса растворения включений TiN в расплаве титана при ЭЛП // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2001. — № 1. — С. 20–24.
6. *Электронно-лучевое оплавление слитков титана* / А. Н. Пикулин, Г. В. Жук, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин // Современ. электрометаллургия. — 2003. — № 4. — С. 17–19.
7. *Электронно-лучевая установка УЭ-121* / Н. П. Тригуб, Г. В. Жук, П. А. Пап и др. // Там же. — 2003. — № 2. — С. 17–20.

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

ЗТМК, Запорожье

Поступила 11.01.2007

УДК 669.187.526.002

МОРФОЛОГИЯ КАРБИДОВ И МИКРОСТРУКТУРА СТАЛИ Р6М5 ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ПЕРЕПЛАВА

П. А. Шпак, Н. И. Гречанюк, В. А. Осокин, А. А. Артемчук

Приведены результаты исследования структуры, химического и фазового составов быстрорежущей стали Р6М5, полученной способом электронно-лучевого переплава, в структуре которой образуется эвтектика двух морфологических типов: преобладающая пластинчатая (на основе метастабильного карбида M_2C) и скелетная (на основе M_6C). Отмечены уменьшение химической неоднородности, высокие дисперсность и равномерность распределения карбидной фазы в слитках ЭЛП.

Results are given of investigation of structure, chemical and phase composition of high-speed steel R6M5, produced by electron beam remelting method, in the structure of which the eutectic of two morphological types is formed: dominating lamellar type (on base of metastable carbide M_2C) and skeleton type (on base of M_6C). The decrease in chemical heterogeneity, high dispersity and uniformity of distribution of carbide phase in ESR ingots was outlined.

Ключевые слова: электронно-лучевой переплав; быстрорежущая сталь; слиток; микроструктура; зерно; карбиды; эвтектика; термическая обработка; теплоустойкость

Введение. Ускоренное управляемое охлаждение при кристаллизации слитков быстрорежущей стали, получаемых способами специальной электрометаллургии, в частности электронно-лучевым переплавом в промежуточной емкости (ЭЛПЕ), вызывает фазовые и структурные изменения, что существенно влияет на свойства металла слитков. Это открывает широкие возможности для получения ка-

чественных слитков с заданным комплексом механических и эксплуатационных свойств путем варьирования контролируемых параметров технологического процесса переплава и последующей обработки [1–4].

Данные об управлении структурообразованием слитков быстрорежущей стали при ЭЛПЕ в литературе практически отсутствуют. В связи с этим в настоящей работе исследованы особенности структурообразования, морфология эвтектики, фазовый и химический составы быстрорежущей стали Р6М5 электронно-лучевого переплава.



Таблица 1. Химический состав быстрорежущей стали Р6М5

Объект исследования	Массовая доля элементов, %								
	C	W	Mo	Cr	V	Mn	Si	S	P
Р6М5 (ЭЛПШЕ)*	0,89	6,2	5,1	3,8	1,86	0,28	0,3	0,011	0,019
Р6М5 (ГОСТ19265-73)	0,82...0,90	5,50...6,50	4,80...5,30	3,80...4,40	1,70...2,10	0,20...0,50	0,20...0,50	≥ 0,025	≥ 0,03

*Результат усреднен по 5 образцам.

Методика проведения исследований. В качестве объекта исследований использовали цилиндрические слитки диаметром 70, 100 и 130 мм, а также слябы 140×160 мм из быстрорежущей стали Р6М5, выплавленные способом ЭЛПШЕ из промышленных отходов инструментального производства по разработанной в НПП «Геконт» технологии [5]. Образцы для исследований вырезали из головной, средней и донной частей слитков вдоль и поперек оси. Микроструктуру образцов изучали на оптическом микроскопе «Leica» DM4000M, оснащенный цифровой камерой «Leica» DFC 150 при увеличении 100, 200, 500 и 1200, на растровом электронном микроскопе «JEOL» Superprobe-733. Химический состав металла определяли с помощью микрорентгеноспектрального анализа на «Spectroscan». Рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре «Philips» X'pert с автоматической регистрацией дифракционной картины. Полученные

результаты обрабатывали с помощью программного пакета PowderCell 2.2.

Результаты исследований и их обсуждение. Химический состав образцов из быстрорежущей стали Р6М5 (ЭЛПШЕ) соответствует марочному, согласно ГОСТ 19265-73 (табл. 1).

Быстрорежущая сталь относится к ледебуритному классу и в литом состоянии характеризуется низкими показателями механических и технологических свойств, особенно пластичности. Поэтому выход годного металла при первом переделе небольшой. Особенности первичной структуры литой стали наследуются даже после полной термической обработки и имеют определяющее влияние на формирование свойств быстрорежущей стали. В структуре быстрорежущей стали присутствует значительная доля эвтектики. При затвердевании в вольфрамомолибденовых быстрорежущих сталях, имеющих широкий (1430...1235 °С) интервал кристалли-

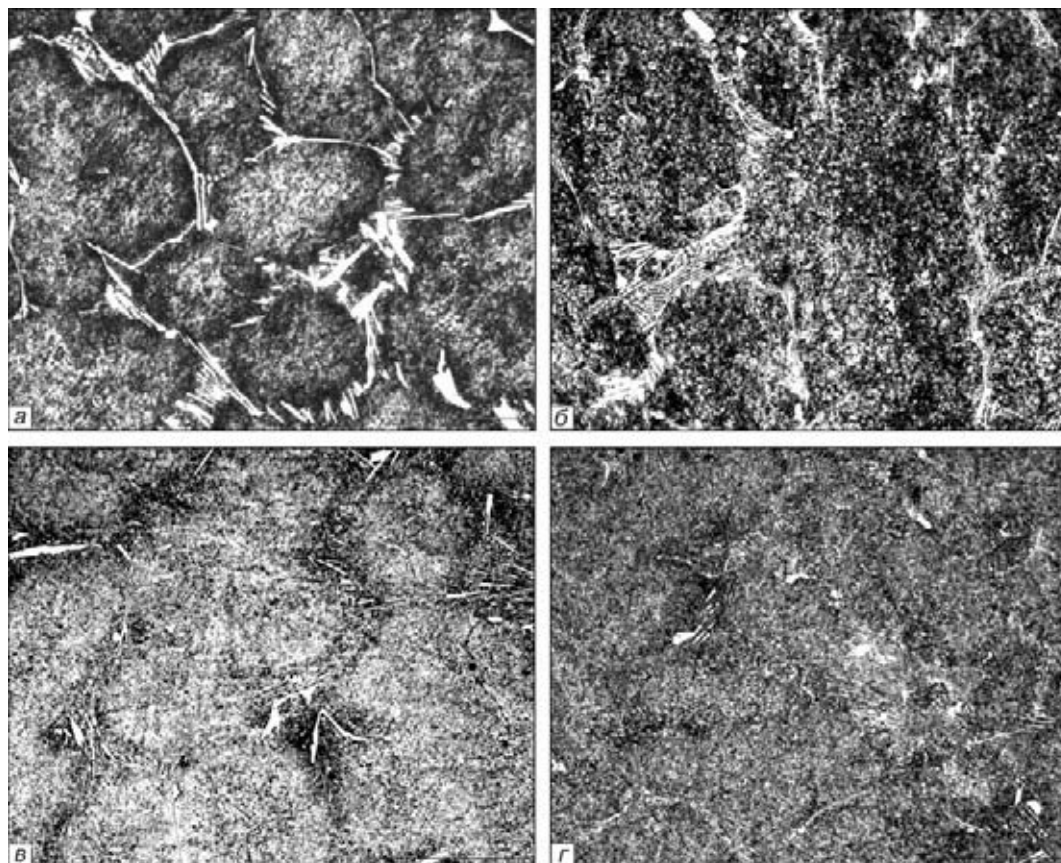


Рис. 1. Микроструктура (×500) быстрорежущей стали Р6М5 (ЭЛПШЕ): а — литая; б — после отжига; в — закаленная; з — после закалки с отпуском



Рис. 2. Морфология эвтектики в литой стали Р6М5 (ЭЛПФЕ), X1200

зации, возможно образование эвтектик четырех морфологических типов: скелетной (на базе карбида M_6C), стержневой и пластинчатой (на основе метастабильного карбида M_2C), а также карбида MC . Для обеспечения максимальной технологической пластичности быстрорежущей стали желательно получение пластинчатой или стержневой эвтектики на базе карбида M_2C , мелкого аустенитного зерна и равномерного распределения структурных составляющих по всему объему слитка [6].

При исследовании поперечных макротемплетов слитков быстрорежущей стали Р6М5 (ЭЛПФЕ) выявлено, что их макроструктура имеет плотное однородное строение, дефекты ликвационного и усадочного характера отсутствуют. При этом в структуре приповерхностной зоны обнаружены равноосные кристаллы диаметром 0,4...1,0 мм (в зависимости от размера слитка), в центральной части слитка — столбчатые кристаллиты. В макроструктуре продольных сечений слитков различаются оси дендритов, ориентированные под углом 30...40° к краевым зонам (нормально к поверхности фронта кристаллизации).

Микроструктура литой быстрорежущей стали Р6М5 (ЭЛПФЕ) состоит из мартенсита (балл аустенитного зерна 9–10), остаточного аустенита, разорванной карбидной сетки (балл 6–7 карбидной неоднородности, согласно ГОСТ 19265–73, шкала 2) по границам зерен и дисперсных карбидов, равномерно распределенных по всему объему слитков (рис. 1, а).

Повышенная ($10...10^2$ °C/с) скорость охлаждения перегретого в промежуточной емкости расплава стали при затвердевании в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе скольжения при ЭЛПФЕ вызвала изменение кинетики ее эвтектической кристаллизации, что сказалось на количестве, морфологии и характере распределения эвтектической составляющей структуры. Карбидная сетка вокруг зерен мартенсита — разорвана (дискретна), а сама эвтектика толщиной 2...7 мкм имеет тонкое ажурное строение (рис. 2).

На дифрактограммах, полученных от образцов из литой стали Р6М5 (ЭЛПФЕ) (рис. 3, а), кроме

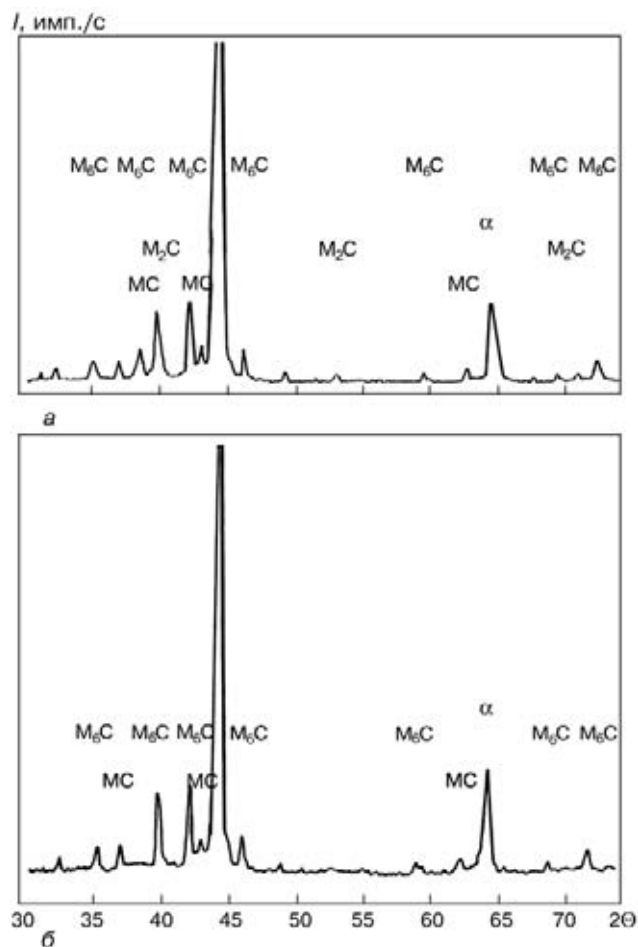


Рис. 3. Дифрактограммы стали Р6М5 (ЭЛПФЕ): а — литая (M_2C — 4,98; $MC(VC)$ — 5,36; M_6C — 6,33; α -Fe — 83,33 мас. %); б — после закалки и отпуска ($MC(VC)$ — 4,21; M_6C — 6,36; α -Fe — 89,43 мас. %); α — твердый раствор углерода в железе (мартенсит); I — интенсивность

интерференций α -твердого раствора (мартенсита), присутствуют пики сравнительной интенсивности и от карбида M_6C , входящего в состав скелетной эвтектики, и от метастабильного M_2C (пластинчатая эвтектика), а также от тугоплавкого карбида MC (VC). Общее количество карбидной фазы в структуре литой стали составляет 18...22 об. %.

Интерференционные максимумы от аустенита на дифрактограммах неразличимы из-за одинакового значения параметра d/n (углового положения интерференции) для аналогичных максимумов карбида M_6C , когерентно связанного с ним в эвтектике. Поэтому количество остаточного аустенита в структуре литой быстрорежущей стали Р6М5 (ЭЛПФЕ) определяли методом магнитного анализа на магнитном аустенометре МАК-2М по калибровочному эталону из закаленной и отпущенной стали Р6М5. Оно относительно невелико (10...12 об. %).

Результаты микрорентгеноспектрального анализа, а также данные растровой электронной микроскопии, полученные в режиме «фазового контраста» в обратно-рассеянных электронах (ВЕИ) подтвердили наличие в структуре литой стали Р6М5 (ЭЛПФЕ) карбидов M_6C , M_2C и MC , а также дисперсных

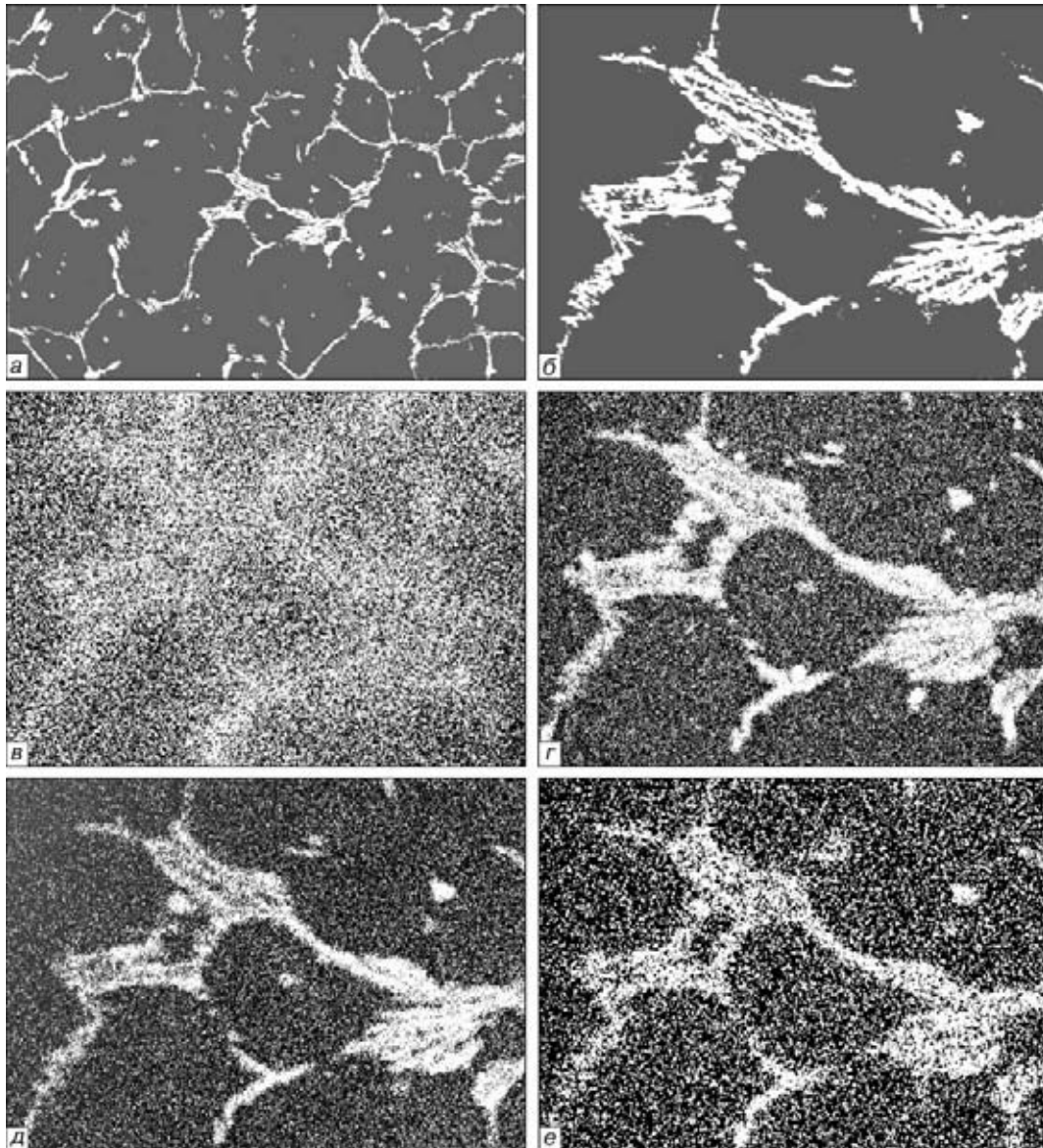


Рис. 4. Распределение легирующих элементов по структурным составляющим в литой быстрорежущей стали P6M5 (ЭЛППЕ): а — X300, BEI; б — X1000, BEI; в — X1000, Cr_{Kα}-излучение; г — X1000, V_{Kα}-излучение; д — X1000, W_{Kα}-излучение; е — X1000, Mo_{Kα}-излучение

вторичных карбидов, равномерно распределенных в объеме зерна (рис. 4).

Анализ распределения основных легирующих элементов по структурным и фазовым составляющим литой стали P6M5 (ЭЛППЕ) свидетельствует о высоком уровне легирования твердого раствора (мартенсита). Хром распределен равномерно между карбидами и твердым раствором, вольфрам и мо-

либден связаны преимущественно в карбидах M₆C и M₂C, а ванадий — в MC (VC). Также в состав карбидной фазы входят вторичные карбиды на основе хрома M₂₃C₆ и M₃C₂, которые рентгенографически неразличимы из-за высокой дисперсности.

Полученные слитки стали P6M5 (ЭЛППЕ) подвергали гомогенизирующему изотермическому отжигу по схеме: аустенизация—нагрев до 880...900 °С,

Таблица 2. Твердость HRC стали P6M5 (ЭЛППЕ) после закалки с отпуском				
Температура нагрева под закалку, °С	Закалка	Отпуск при температуре 560 °С		
		первый	второй	третий
1180	61,0... 61,5	61... 63	62... 64	62,5... 64,0
1200	59,0... 60,5	62... 63	63... 64	63,0... 65,0
1220	58,0... 59,5	62... 63	63... 65	63,0... 65,5
1240	58,0... 60,0	62... 63	62... 65	63,0... 65,0



выдержка 3 ч (эвтектоидное превращение), охлаждение до 760...780 °С, изотермическая выдержка 6 ч (диффузионное превращение) с последующим медленным охлаждением с печью до 400 °С. Для защиты поверхности слитков от обезуглероживания и окисления использовали засыпку из чугунной стружки и защитную атмосферу в печи (эндогаз).

Структура отожженной стали по приведенной выше схеме состоит из глобулярных зерен сорбитоподобного перлита (бал зерна 9–10, согласно ГОСТ 19265–73), остатков разорванной карбидной сетки по границам зерен и равномерно распределенных дисперсных карбидов (рис. 1, б).

Для определения оптимальных режимов окончательной термообработки быстрорежущей стали Р6М5 (ЭЛППЕ) исследовали влияние параметров закалки и отпуска на ее структуру, фазовый состав, твердость и теплостойкость (табл. 2).

Значения твердости *HRC* стали Р6М5 (ЭЛППЕ) в зависимости от среды охлаждения для закалки после дополнительного отпуска при температуре 580 °С продолжительностью 180 мин следующие: $\text{KNO}_3 + 30\% \text{NaOH}$ (400...420 °С) — 61,0...62,0; масло — 61,0...61,5; вода — 60,0...61,5; воздух — 58,5...59,0.

Структура быстрорежущей стали Р6М5 (ЭЛППЕ) после закалки состоит из игольчатого мартенсита, остаточного аустенита, остатков карбидной сетки по границам зерен и структурно-обособленных карбидов компактной формы, равномерно распределенных по сечению шлифа (рис. 1, в). Высоколегированный мартенсит быстрорежущей стали относительно трудно поддается травлению. Количество остаточного аустенита составляет 14...18 об. %.

При отпуске закаленной быстрорежущей стали в металле происходит вторичное упрочнение в результате выделения из твердого раствора дисперсных избыточных карбидов, а при последующем охлаждении — превращение остаточного аустенита в мартенсит. В ходе исследования микроструктуры выявлено, что в образцах, нагретых для закалки ниже принятого интервала температур и после однократного отпуска в структуре сохраняются границы полиэдров (зерен). На фоне мартенсита остаются поля, обогащенные аустенитом с малой протравливаемостью. При повышении температуры нагрева под закалку увеличивается размер зерна от балла 10–11 при 1180 °С до балла 8–9 при 1240 °С (ГОСТ 5639–65, шкала 1). Структура быстрорежущей стали Р6М5 (ЭЛППЕ) после закалки с отпуском состоит из высоколегированного отпущенного мартенсита, остаточного аустенита (3...5 об. %), остатков разорванной карбидной сетки по границам и карбидов, основным из которых является M_6C . Присутствуют также M_3C_2 и M_3C , составляющие 8...12 об. % всей карбидной фазы (рис. 1, г). Стро-

ение мартенсита между карбидными строчками вследствие микроликвации является безыгольчатым, а в областях скопления карбидов присутствует игольчатый мартенсит с низкой травимостью.

Анализ дифрактограмм от закаленных и отпущенных образцов (рис. 3, б) свидетельствует о том, что при их нагреве до температуры закалки в исходном метастабильном карбиде M_2C происходит его превращение в более стабильные карбиды M_3C и M_6C с последующей коагуляцией. Также обнаружено уменьшение удельного углового уширения пиков интерференционных линий мартенсита и увеличение их интенсивности, что свидетельствует об уменьшении внутренних напряжений в твердом растворе и о кубическом строении мартенсита после двукратного отпуска закаленной быстрорежущей стали.

Выводы

1. Показано, что структурные изменения, происходящие на стадии затвердевания расплава быстрорежущей стали Р6М5 при ЭЛППЕ, оказывают благоприятное влияние на фазовые превращения и формирование однородной дисперсной структуры литого металла.

2. Определено, что при электронно-лучевом переплаве в структуре литой быстрорежущей стали Р6М5 образуются эвтектики двух типов: пластинчатой (55...60 об. %) на основе метастабильного карбида M_2C и скелетной на основе карбида M_6C .

3. Обнаружено, что тугоплавкие карбиды типа M_3C в стали Р6М5 (ЭЛППЕ) выделяются при кристаллизации на стадии перитектического превращения и эвтектики не образуют.

1. Чаус А. С., Рудницкий Ф. И. Структура и свойства литой быстророхлажденной быстрорежущей стали Р6М5 // Металловед. и терм. обраб. металлов. — 2003. — № 5. — С. 3–7.
2. Балабанов П. А., Боримський О. І., Делеві В. Г. Структура і механічні властивості матриць апаратів високого тиску із сталі Р6М5, одержаної різними методами // Металознав. та оброб. металів. — 2004. — № 1. — С. 7–11.
3. Шпак П. А., Гречанюк В. Г., Осокин В. А. Влияние электронно-лучевого переплава на структуру и свойства быстрорежущей стали Р6М5 // Пробл. спец. электротехнологий. — 2002. — № 3. — С. 14–17.
4. Vocolini M., Goldstein H. Solidification of high speed steel // Intern. Materials Rev. — 2001. — 46, No. 2. — P. 92–107.
5. Пат. 37658 Україна, МКІ С22 В9/22, С22 С38/12, 38/10. Спосіб виготовлення заготовок для інструменту із швидкорізальної сталі та пристрій для його здійснення / М. І. Гречанюк, І. Б. Афанасьєв, П. О. Шпак та ін. — Опубл. 15.07.2003; Бюл. № 7.
6. Формирование структуры быстрорежущих сталей при кристаллизации / П. Ф. Нижниковская, Е. П. Калинушкин, Л. М. Снаговский и др. // Металловед. и терм. обраб. металлов. — 1982. — № 11. — С. 23–30.

НПП «Геконт», Винница

Поступила 16.06.2006