

УДК 621.785

Н.В. Безенкин

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МЕДНЫХ ПОКОВОК СТЕНОК КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ

N.V. Bezenkin

THE EFFECT OF PLASTIC DEFORMATION ON STRUCTURE AND PROPERTIES OF COPPER PLATES IN CASTING MOLD

Эффективность процесса непрерывного литья заготовок зависит от многих факторов, в частности от механических свойств рабочих стенок кристаллизаторов, служащих для отвода теплоты при формировании слитка. Анализировали образцы из бескислородной меди в диапазоне температур 23–400 °С. Исследованы зависимости механических свойств от температуры для образцов со степенью суммарной деформации от 15 до 85 %. Выявлено, что наилучшими эксплуатационными свойствами обладают стенки кристаллизаторов из бескислородной меди М-ЭЛП, деформированные до суммарной степени деформации 20–25 % при количестве проходов кузнечного бойка равном 10.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ; НЕПРЕРЫВНОЕ ЛИТЬЕ; СБОРНЫЙ КРИСТАЛЛИЗАТОР; БЕСКИСЛОРОДНАЯ МЕДЬ; ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ.

The metal production efficiency in the case of continuous casting mostly depends on mechanical properties of copper plates in casting mold. Experiments had been provided on oxygen-free copper specimens under conditions of high-temperature — 23–400 °С. The relations between mechanical properties of deformed specimens (15–85 % degree of stain) and temperature had been studied. The casting mold plates made of oxygen-free copper were shown to have best operating properties being deformed by 20–25 % degree of stain.

MATERIAL SCIENCE; CONTINUOUS CASTING; COPPER PLATE MOLD; OXYGEN-FREE COPPER ALLOY; PLASTIC DEFORMATION.

Металлургия относится к базовым отраслям передовых в промышленном отношении стран. Для развития отрасли в нашей стране необходимо повысить эффективность производственных процессов, ибо пока здесь низкая производительность труда, высокая стоимость изделий, велики затраты материалов и невысокое качество продукции. Одна из главных задач отечественной черной металлургии — повышение конкурентоспособности заготовок, полученных на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Кристаллизатор, служащий для отвода теплоты при кристаллизации затвердевающего металла, относится к ответственным узлам в МНЛЗ. Рабочие стенки кристаллизатора рабо-

тают в условиях циклических интенсивных тепловых потоков и термодинамических напряжений, интенсивного износа, разных типов коррозии, температур в диапазоне 20–550 °С. Срок службы стенок кристаллизаторов значительно меньше срока службы других сменных деталей МНЛЗ. Отказы приводят к простоям, авариям на производстве, влияют на экологическую безопасность и безопасность труда.

Для существующего отечественного производства медных кристаллизаторов характерны низкий технологический уровень, значительный износ оборудования, большая трудоемкость процесса, нерентабельность, низкий уровень качества продукции и, как следствие, ее неконкурент-

тоспособность на мировом рынке [1–5]. Применяемые сегодня технологии изготовления кристаллизаторов недостаточно совершенны и требуют научного обоснования, вследствие чего особую актуальность приобретает выбор материала и степени пластической деформации, обеспечивающих высокие эксплуатационные свойства кристаллизаторов.

Анализ публикаций и экспертные оценки специалистов показали, что на физико-механические свойства технической меди оказывают влияние в различной степени химический состав примесей, напряженно-деформированное состояние (литое, деформированное, отожженное), способ получения полуфабриката (прокатка, прессование, ковка, волочение), температура испытания, степень, скорость и дробность пластической деформации. В то же время в существующей научно-технической литературе нет рекомендаций по выбору наиболее эффективных технологических режимов получения медных стенок кристаллизаторов повышенной износостойкости и прочности [2–9].

Цель нашей работы заключалась в выборе технологии изготовления стенок кристаллизаторов из бескислородной меди, обладающих высокими эксплуатационными свойствами.

Материал и методика

Для исследования напряженно-деформированного состояния и механических свойств заготовок стенок кристаллизаторов из бескислородной меди М-ЭЛП была проведена серия высокотемпературных испытаний на образцах с различной дробностью и степенью пластической деформации. Применялись методы механических испытаний в соответствии с ГОСТ 9651–84 и ГОСТ 1497–84. Исследования выполнены на испытательной машине ИМ12-А, снабженной муфельной печью для нагрева образцов и системой регулирования температуры.

Машина ИМ-12А рассчитана на максимальное разрывное усилие 120 кН. Конструктивно машина ИМ-12А относится к типу испытательных машин с механическим нагружением образца и механическим динамометром. Испытания проводили в диапазоне температур 20–400 °С. Время нагрева до заданной температуры и выдержку выбирали из условия равномерности распределения температуры по длине

образца и минимальной длительности испытаний. Общая продолжительность нагрева не превышала 60 мин. Время выдержки при каждой заданной температуре составляло 20 мин. Температуру регистрировали хромель-алюмелевой термопарой (диаметр проволоки 0,2 мм), закрепленной в центре рабочей части образца, и регулируемым потенциометром КСПЗ-П. Диапазон измерений составляет от –50 °С до 1000 °С.

Образец крепили в зажимах испытательной машины. На диаграммном записывающем устройстве воспроизводился процесс испытания в виде кривой, расположенной в системе координат «нагрузка — деформация». Масштабы записи по оси деформации находились в диапазоне 1–100 мм.

Результаты экспериментов

На основании проведенных испытаний в диапазоне 23–500 °С были построены сериальные кривые (рис. 1), определены в зависимости от температуры испытания прочностные и пластические свойства материала кристаллизатора: условный предел прочности σ_B , относительное удлинение δ и сужение ψ .

Как видно из графика, изображенного на рис. 1, с увеличением степени предварительной пластической деформации от 14 до 34 % во всем температурном диапазоне материала кристаллизатора наблюдается плавное увеличение прочностных свойств и скачкообразное уменьшение пластических свойств.

На рис. 2 приведены кривые изменения твердости меди в зависимости от температуры после различной степени деформации ε .

Обсуждение результатов

Пластичность материала предопределяет износостойкость и усталостную прочность стенок кристаллизаторов. Для оценки указанных характеристик в качестве контрольной величины допускается использовать значение твердости *НВ* по Бринеллю. По результатам изменения твердости определяют интенсивности напряжений и деформаций в пластической области. Недостаток данной характеристики в том, что величина твердости не позволяет достаточно точно определить степень деформации сдвига, соответствующую разрушению металла [2]. В качестве локальной характеристики пластичности

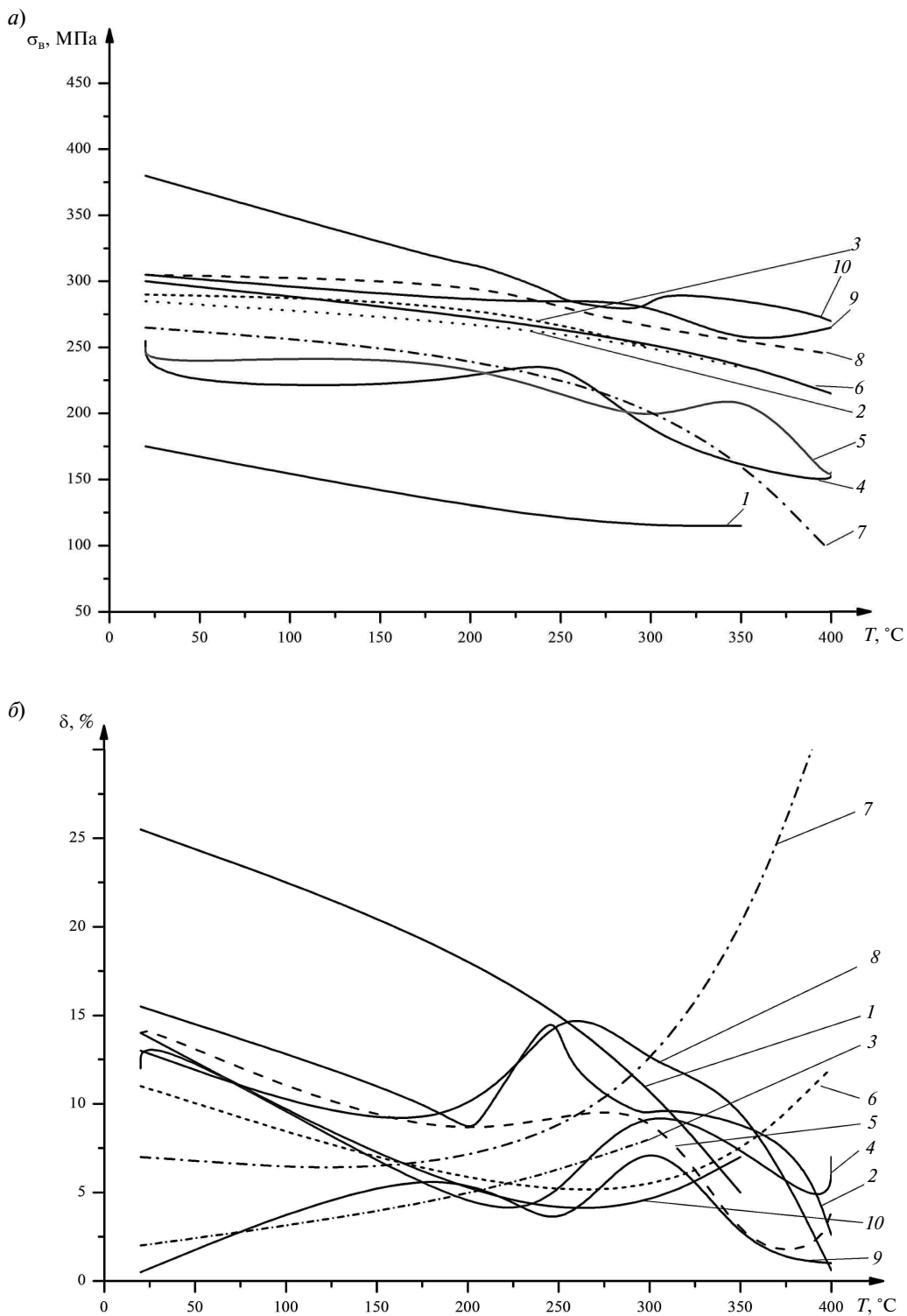


Рис. 1. Температурная зависимость предела прочности σ_B (а), удлинения δ (б) и сужения ψ (в) меди после различной степени деформации ϵ , %:

14,28 (1); 34,2 (2); 34,2 (3); 37,5 (4); 40,6 (5); 42,5 (6); 50 (7); 70,6 (8); 73,45 (9); 82,3 (10)

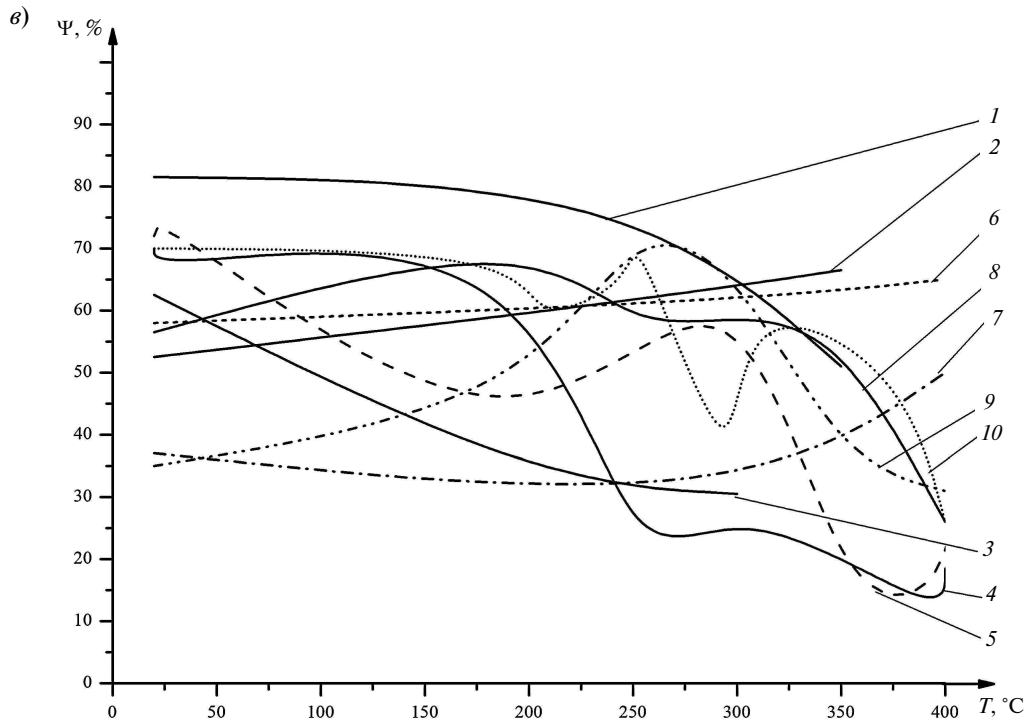


Рис. 1. (Окончание)

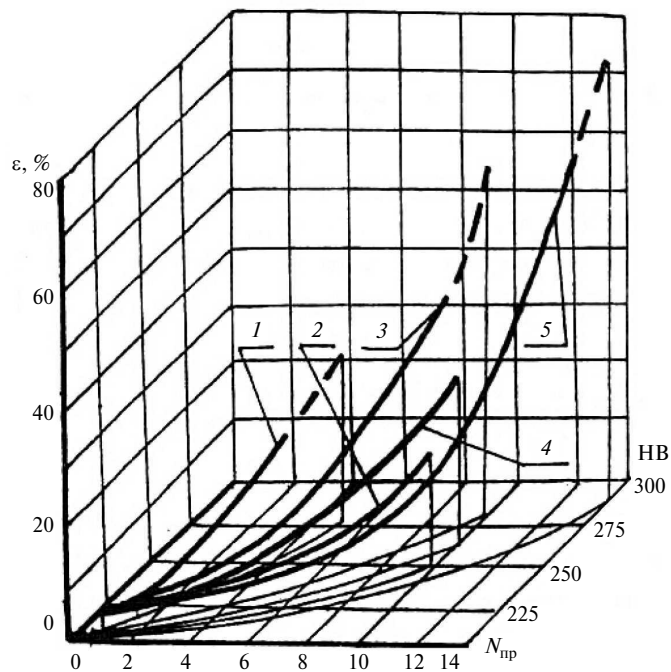


Рис. 2. Влияние дробного деформирования на показатели механических свойств стенок сборного кристаллизатора при холодной кузнечной протяжке:
 1 — $\varepsilon = 30\%$, $N_{пр} = 5$; 2 — $\varepsilon = 22\%$, $N_{пр} = 10$; 3 — $\varepsilon = 58\%$, $N_{пр} = 10$; 4 — $\varepsilon = 30\%$, $N_{пр} = 10$; 5 — $\varepsilon = 80\%$, $N_{пр} = 14$

В.Л. Колмогоров [3] предложил два показателя напряженного состояния: показатель

$$\Pi = \frac{\sigma}{T_i} = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{\sqrt{3}\sigma_i}$$

(здесь T_i — интенсивность касательных напряжений, $T_i = \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}}$; σ_i — интенсивность нормальных напряжений; $\sigma = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3$; σ — гидростатическое давление) и показатель Лоде

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_{yy} - \sigma_{xx} - \sigma_{zz}}{\sigma_{xx} - \sigma_{zz}}$$

Показатель Лоде не зависит ни от формы шейки образца, ни от давления и остается неизменным в процессе испытания.

Оценка деформируемости материала основана на сопоставлении интенсивности деформации ε_p , которую частица претерпела в процессе формоизменения, с критической интенсивностью деформации ε_p , предсказанной по диаграмме пластичности.

Степень деформации сдвига λ_p при растяжении определяли по формуле, предложенной в [4]:

$$\lambda_p = 2\sqrt{3} \ln \frac{d_0}{d_p},$$

где d_0 — исходный диаметр образца; d_p — диаметр образца в момент разрушения.

Диаграмма пластичности бескислородной меди М-ЭЛП в зависимости от суммарной относительной деформации ε_Σ и количества $N_{пр}$ проходов заготовки кузнечным бойком приведена на рис. 3 [4].

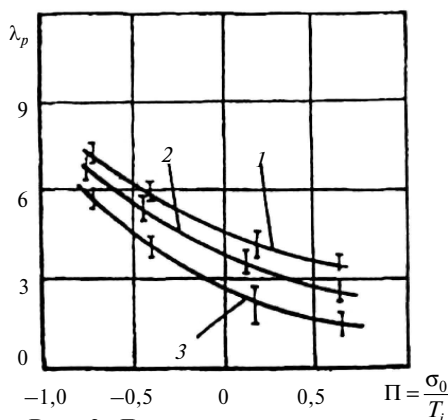


Рис. 3. Диаграмма пластичности меди М-ЭЛП в зависимости от суммарной степени деформации заготовки ε :

1 — $\varepsilon = 0$; 2 — $\varepsilon = 22$, $N_{пр} = 10$;
3 — $\varepsilon = 73\%$, $N_{пр} = 14$

Производственные испытания показали, что рационален следующий технологический режим предварительной пластической деформации материала заготовки кристаллизатора: $\varepsilon = 20-25\%$, $N_{пр} = 10$. Полученная мелкозернистая структура, соответствующая данному режиму, представлена на рис. 4, а.

Увеличение степени пластической деформации до 40 % за те же 10 проходов приводит к формированию вдоль границ зерен частиц второй фазы (концентраторы) в виде окислов и закислов меди (рис. 4, б), которые оказывают отрицательное влияние на пластичность, технологичность и коррозионную стойкость медной заготовки.

Дистракционная пластичность металла приводит к возникновению микронесплошности и образованию магистральных трещин [5]. Магистральные трещины можно устранить увеличением количества проходов бойка, но это снижает производительность процесса [5]. При степени деформации поковки, превышающей 37 %, образуется строчечная структура металла, которая ухудшает механические свойства медных стенок кристаллизаторов.

Улучшение механических свойств меди в результате их деформирования объясняется тем, что в деформированных зернах активное окисление границ зерен снижается, а прочность границ зерен уменьшается менее существенно. Кроме того, измельчение зерен при деформировании также способствует повышению прочности границ [7].

Механические свойства и однородность получаемой структуры медных стенок кристаллизаторов, формообразованных холодной кузнечной протяжкой, существенно зависят от неравномерности перераспределения дислокационных скоплений в процессе пластической деформации. Исследования плотности дислокаций выполнялись на электронном микроскопе Philips.

Установлено, что в исходном (литом) состоянии заготовки плотность дислокаций соответствует $\rho_{дис} = 10^6-10^7$ см⁻². Возникновение при холодном деформировании литой заготовки различного рода препятствий движению дислокаций обеспечивает увеличение плотности дислокаций до $\rho_{дис} = 10^{11}-10^{13}$ см⁻² и делает их распределение более равномерным. Это благоприятный фактор, так как высокая плотность

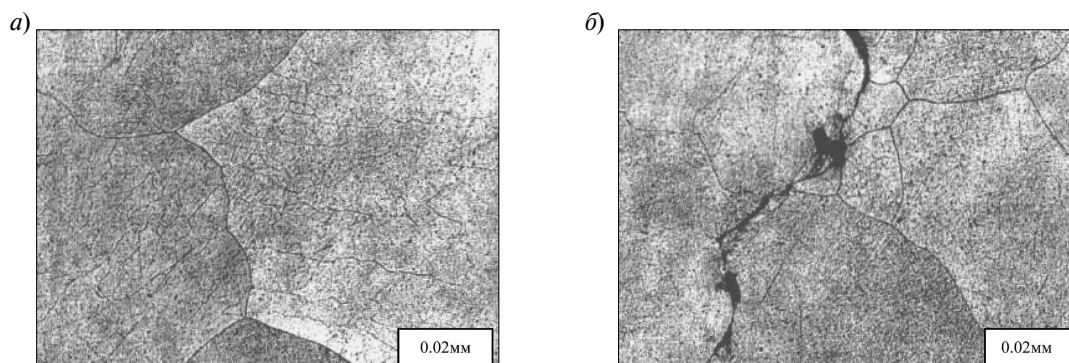


Рис. 4. Микроструктура материала стенки кристаллизатора после деформации:
 а — $\varepsilon = 22\%$, $N_{\text{пр}} = 10$; б — $\varepsilon = 40\%$, $N_{\text{пр}} = 10$

дислокаций и равномерность их распределения способствуют локализации деформации.

При суммарной степени деформации более 37 % плотность $\rho_{\text{дис}}$ дислокаций превышает 10^{12} см^{-2} , что приводит к значительному возрастанию взаимодействия полей от близко расположенных дислокаций и межкристаллитной деформации [2].

В результате перераспределения дислокационных скоплений в развитую субструктуру заготовки стенок кристаллизатора из бескислородной меди М-ЭЛП (99,98 % Cu; 0,002 % Vi; 0,002 % P; 0,004 % Fe; 0,001 % S; 0,001 % O₂; 0,001 % Zn), формируемые при суммарной степени деформации $\varepsilon = 20\text{--}25\%$, имеют механические свойства, сопоставимые со свойствами горячекатаной меди М1р (99,9 % Cu+Ag, 0,002 % P).

Лучшие эксплуатационные характеристики имеют стенки кристаллизаторов из бескислородной меди М-ЭЛП, деформированные холодной кузнечной протяжкой до суммарной отно-

сительной деформации $\varepsilon_{\Sigma} = 20\text{--}25\%$ при количестве проходов кузнечного бойка $N_{\text{пр}} = 10$.

В результате проведенных исследований установлено следующее:

с ростом степени предварительной пластической деформации поковки до 37 % улучшаются механические свойства стенок кристаллизаторов, работающих в диапазоне температур 970–1000 К за счет измельчения структуры и повышения прочности меди;

при увеличении числа проходов (дробность) пластической деформации происходит увеличение твердости (прочность) материала поковок;

в процессе холодной кузнечной протяжки поковки из меди М-ЭЛП при суммарной относительной деформации 20–25 % и количестве проходов кузнечного бойка 10 происходит улучшение механических свойств материала, что позволяет рекомендовать этот режим деформирования заготовки для изготовления стенок кристаллизаторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Паршин В.М. Сооружение литейно-прокатных комплексов — решение проблемы производства конкурентоспособной продукции // Сталь. 1999. № 6. С. 26–28.
2. Аптекарева О.Н. Технология изготовления заготовок из бескислородной меди для стенок сборных кристаллизаторов: Автореф. дис. ... канд. тех. наук СПб., 2008. — 16 с.
3. Колмогоров В.Л. Пластичность и разрушение / Под ред. В.Л. Колмогорова. М.: Metallurgy, 1977. 336 с.
4. Абрамова Н.Б., Аптекарева О.Н., Востров В.Н. Надежность бойков для холодной кузнечной протяжки медных поковок // Металлообработка. 2010. № 3(57). С. 26–32.
5. Абрамова Н.Б., Аптекарева О.Н. Разработка технологии изготовления заготовок для медных стенок кристаллизаторов МНЛЗ // Заготовительные производства в машиностроении. 2007. №3. С. 53–55.
6. Паршин В.М., Буланов Л.В. Непрерывная разливка стали. Липецк: Изд-во ОАО «НЛМК», 2011. 221 с.

7. **Скворцов А.А., Акименко А.Д.** Теплопередача и затвердевание стали в установках непрерывной разливки. М.: Metallurgiya, 1966. 190 с.

8. **Ferry M.** Direct Stripcasting of Metals and Alloys: Processing, Microstructure and Properties.

Woodhead Publishing Limited and CRC Press LTD, 2006. 275 p.

9. **Sahai Y., Emi T.** Tundish Technology For Clean Steel Production. World Scientific Publishing Company. 2008. 316 p.

REFERENCES

1. **Parshin V.M.** Sooruzheniye liteyno-prokatnykh kompleksov — resheniye problemy proizvodstva konkurentosposobnoy produktsii. *Stal.* 1999. № 6. S. 26–28. (rus.)

2. **Aptekareva O.N.** Tekhnologiya izgotovleniya zagotovok iz beskislородной меди для стенок сборных кристаллизаторов: Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. SPb., 2008. 16 s. (rus.)

3. **Kolmogorov V.L.** Plastichnost i razrusheniye / Pod red. V.L. Kolmogorova. M.: Metallurgiya, 1977. 336 s. (rus.)

4. **Abramova N.B., Aptekareva O.N., Vostrov V.N.** Nadezhnost boykov dlya kholodnoy kuznechnoy protyazhki mednykh pokovok. *Metalloobrabotka.* 2010. № 3(57). S. 26–32. (rus.)

5. **Abramova N.B., Aptekareva O.N.** Razrabotka tekhnologii izgotovleniya zagotovok dlya mednykh stенок кристаллизаторов MNLZ. *Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii.* 2007. №3. S. 53–55. (rus.)

6. **Parshin V.M., Bulanov L.V.** Nepreryvnaya razlivka stali. — Lipetsk: Izd-vo OAO «NLMK», 2011. 221 s. (rus.)

7. **Skvortsov A.A., Akimenko A.D.** Teploperedacha i zatverdevaniye stali v ustanovkakh nepreryvnoy razlivki. M.: Metallurgiya, 1966. 190 s. (rus.)

8. **Ferry M.** Direct Stripcasting of Metals and Alloys: Processing, Microstructure and Properties. Woodhead Publishing Limited and CRC Press LTD. 2006. 275 p.

9. **Sahai Y., Emi T.** Tundish Technology For Clean Steel Production. World Scientific Publishing Company. 2008. 316 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БЕЗЕНКИН Николай Валентинович — аспирант Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: vol4arok@gmail.com

AUTHORS

BEZENKIN Nikolay V. — St.-Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya Str., St.-Petersburg, 195251, Russia. E-mail: vol4arok@gmail.com