



УДК 621.74

Поступила 11.02.2015

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРОФИЛАКТИКИ ПРИГАРА НА ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЬНЫХ И ЧУГУННЫХ ОТЛИВОК ANALYSIS OF THE METHODS OF PREVENTION OF BURNING-IN ON THE SURFACE OF STEEL AND CAST IRON MOULDINGS

Ю. А. НИКОЛАЙЧИК, Ф. И. РУДНИЦКИЙ, А. В. БАТАЙЧУК, В. В. МУДРЫЙ,  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

Y. NIKOLAICHNIK, F. RUDNICKIY, A. BATAICHUK, V. MUDRYI, Belarusian National Technical University,  
Minsk, Belarus

*В статье рассмотрены известные теории и подходы, объясняющие природу процессов образования пригара на поверхности стальных и чугунных отливок, а также описаны методы и материалы, применяющиеся в составах противопригарных покрытий и формовочных смесей для профилактики дефектообразования.*

*The known theories and approaches explaining the nature of formation process of a metal penetration (burning-in) on a surface of steel and iron castings are described in the article. The methods and materials which are applied in antistick coatings and in the molding sand mixtures for prevention of defect formation is also given in the paper.*

**Ключевые слова.** Отливка, качество поверхности, пригар.

**Keywords.** Cast, quality of the surface, burning-in.

В настоящее время в Республике Беларусь насчитывается около 135 действующих литейных цехов и участков общей мощностью более 400 тыс. т отливок в год. Из них на отливки из стали и чугуна, изготавливаемые в разовые песчаные формы, приходится около 80% общего объема. Такие цифры вызваны высокой производительностью и универсальностью процесса изготовления отливок в разовых песчаных формах, который позволяет получать отливки массой от нескольких граммов до десятков тонн. Один из недостатков такой технологии – недостаточно высокое качество поверхности отливок, обусловленное образованием различных дефектов поверхности, из которых пригар является самым распространенным. Очистка отливок от пригара вызывает дополнительные затраты материальных и трудовых ресурсов, которые могут достигать 40–60% общего объема трудоемкости изготовления, что в итоге существенно увеличивает себестоимость готовых изделий и снижает их конкурентоспособность.

Среди известных теорий и гипотез, которые не только в определенных случаях адекватно отражают природу взаимодействия расплава и литейной формы, но и объясняют первопричины образования дефектов поверхности отливок, необходимо выделить три основополагающих направления:

- первое связано с изучением термохимических процессов на границе раздела «расплав – литейная форма»;
- второе заключается в исследовании гидродинамических процессов взаимодействия в контактной зоне «расплав – литейная форма»;
- третье – в изучении параметров теплообмена между отливкой и литейной формой и связанных с ним физических процессов.

К первому направлению необходимо отнести три основные теории: окислительную теорию (включая теорию нулевой зоны и зазора); ориентационного соответствия; промежуточных соединений. Общим в названных теоретических подходах считается то, что природа образования пригара на поверхности отливок из стали и чугуна одинакова, а основная его причина – окислительные процессы, протекающие при заливке. При этом связующим звеном между отливкой и литейной формой являются продукты химических реакций оксидов расплава с материалом литейной формы. В результате такого химического

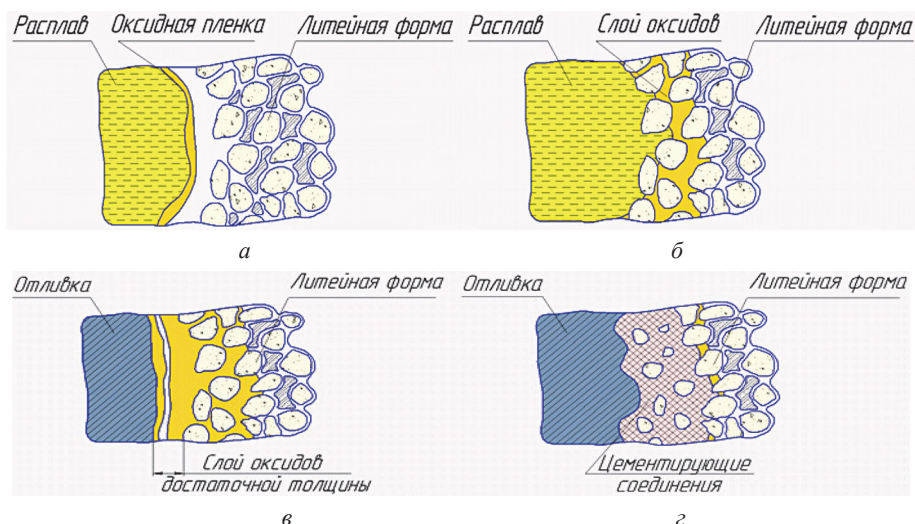


Рис. 1. Схема многостадийного процесса взаимодействия расплава и литейной формы: а – этап окисления расплава в период заполнения литейной формы; б – этап фильтрации расплава в капилляры литейной формы; в – этап формирования оксидной пленки; г – этап образования легкоплавких цементирующих соединений типа фаялита

взаимодействия при высоких температурах образуются комплексные соединения, подобные некоторым природным минералам и имеющие более низкую температуру плавления, чем температуры заливки формы железоуглеродистыми сплавами [1–7]. С точки зрения кристаллохимического строения образующиеся промежуточные соединения в процессе затвердевания формируют кристаллические решетки, схожие по параметрам как с металлом отливки, так и с материалом литейной формы. В большинстве случаев промежуточными соединениями служат мета- и ортосиликаты металлов, такие, как метасиликат железа – пироксен ( $\text{FeSiO}_4$ ), ортосиликат железа – фаялит ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ), а также метасиликат марганца – родонит ( $\text{MnSiO}_4$ ) и ортосиликат марганца – тефроит ( $\text{Mn}_2\text{SiO}_4$ ). Автор работы [8], анализируя прочность сцепления металла с литейной формой, установил, что в процессе термохимического взаимодействия, кроме указанных силикатов, также возможно образование и эвтектик, например, состава  $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ,  $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{SiO}_4$ , которые значительно повышают прочность пригарных корок.

Необходимо отметить, что на основании описанных выше теоретических подходов, объясняющих механизм образования пригара, их авторы неразрывно разрабатывали и методы его профилактики, основанные на регулировании окислительных процессов в контактной зоне.

Здесь необходимо выделить два различных подхода решения проблемы: первый заключается в увеличении степени окисления расплава в процессе взаимодействия с литейной формой, что реализуется путем применения в составах противпригарных покрытий, а также формовочных смесей модифицирующих добавок материалов-окислителей; второй основывается на процессе восстановления оксидов расплава путем создания в контактной зоне «расплав – литейная форма» восстановительной атмосферы.

Оба направления основаны на схеме контактного взаимодействия (рис. 1).

Считается, что процесс образования пригара состоит из нескольких этапов: окисление расплава атмосферой литейной формы в период заполнения (рис. 1, а); фильтрация окисленного расплава в капилляры литейной формы (рис. 1, б); образование в контактной зоне «расплав – литейная форма» оксидной пленки (рис. 1, в) и цементирующих соединений (рис. 1, г). Если скорость образования оксидов будет превышать скорость их расхода на образование цементирующих соединений, то на границе раздела формируется зазор (слой оксидов достаточной толщины), по которому пригарная корка легко отделяется от отливки.

Для профилактики образования поверхностных дефектов в качестве окислительных добавок как в составах противпригарных покрытий, так и формовочных смесей исследователи рекомендуют использовать такие материалы, как перманганат калия ( $\text{KMnO}_4$ ), пятиокись ванадия ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ) в комбинации с сульфатом натрия ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), хлориды ( $\text{MnCl}_2$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{FeCl}_2$ ,  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{NaCl}$ ) и фториды ( $\text{CaF}_2$ ,  $\text{NaF}$ ,  $\text{KF}$ ) металлов. Согласно [9], возможно использование марганцевой и гематитовой руды.

Для создания восстановительной атмосферы в контактной зоне «расплав – литейная форма» в первую очередь актуально использование в составах противпригарных покрытий материалов на основе углеродсодержащих соединений, например, аморфного и кристаллического графита, пироуглерода, шунгита. Также известно о применении карбонатов щелочноземельных металлов ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{ZnCO}_3$ ), которые, разлагаясь при высокой температуре, образуют значительное количество газообразных продуктов

(CO и CO<sub>2</sub>), способствующих созданию в контактной зоне «расплав – литейная форма» восстановительной атмосферы [10]. Кроме того, известно о применении материалов, пассивирующих процесс окисления металла, например, алюминиевой пудры [11] или ферросилиция [3].

К наиболее значимому достижению авторов, исследовавших способы управления окислительными процессами в контактной зоне «расплав – литейная форма», следует отнести введение понятия «легкоотделимый пригар» и связанные с ним описания методов его количественной оценки. Окислительная теория пригарообразования получила широкое распространение в XX ст., а применение разработанных на ее основе приемов профилактики пригара, хотя и узкоориентированных на условия конкретного литейного цеха, в ряде случаев и сегодня дает определенный положительный результат.

Анализ работ, направленных на исследование гидродинамического взаимодействия расплава и литейной формы, показывает, что образование пригара определяется процессами капиллярной фильтрации расплава в межзеренное пространство литейной формы и, как результат, образование на поверхности отливок «металлизированного» или «механического» пригара. Проникновение расплава в поры литейной формы характеризуется двумя условиями. Во-первых, условием, связанным с критической температурой проникновения. Считается, что для начала фильтрации расплава в литейную форму необходимо, чтобы температура поверхности последней достигла определенного критического значения:

$$T_{\text{п}} \geq T_{\text{кр}}, \quad (1)$$

где  $T_{\text{п}}$  – температура поверхности литейной формы, °С;  $T_{\text{кр}}$  – критическая температура проникновения расплава, °С.

В свою очередь температура поверхности литейной формы определяется многими факторами [5]: температурой и продолжительностью заливки, толщиной и конфигурацией отливки, теплофизическими свойствами литейной формы и другими факторами. Критическая температура, согласно [21], для разных сплавов может принимать значения от температуры солидус  $T_{\text{сол}}$  до температуры ликвидус  $T_{\text{лик}}$ . Для сплавов, кристаллизующихся в виде твердого раствора  $T_{\text{кр}} = T_{\text{лик}}$ , для сплавов, кристаллизующихся с большим содержанием эвтектики  $T_{\text{кр}} = T_{\text{сол}}$ , а если сплавы имеют перитектическое превращение, то критическая температура может быть найдена из выражения:

$$T_{\text{кр}} = \frac{1}{2} (T_{\text{лик}} + T_{\text{сол}}). \quad (2)$$

Вторым условием, определяющим процесс проникновения расплава в поры литейной формы, является условие, связанное с критическим давлением проникновения, которое заключается в том, что для предотвращения фильтрации расплава в литейную форму металлостатическое давление должно быть меньше критического:

$$P_{\text{м}} \leq P_{\text{кр}}, \quad (3)$$

где  $P_{\text{м}}$  – металлостатическое давление расплава в литейной форме, МПа;  $P_{\text{кр}}$  – критическое давление проникновения расплава, МПа.

Металлостатическое давление определяется в первую очередь величиной гидростатического напора, а критическое давление проникновения расплава зависит от капиллярного и газового противодействия литейной формы, поверхностного натяжения расплава, скорости заливки и других факторов.

К известным методам профилактики образования «механического» пригара следует отнести такие мероприятия, как снижение температуры и времени заливки, уменьшение гидростатического напора, применение различных противопригарных добавок на основе материалов, способных резко увеличивать свой объем при нагреве до высоких температур и заполнять межпоровое пространство литейной формы, тем самым, противодействовать проникновению расплава в ее капилляры [12]. Аналогичные результаты может дать применение материалов, увеличивающих газовое давление в порах формы [5, 13]. Но использование как одних, так и других материалов чревато образованием газовых дефектов в отливках, что и является причиной их весьма ограниченного применения в практике литейных цехов.

Анализ результатов работ [14–20] и других авторов, изучавших теплофизические аспекты взаимодействий в контактной зоне «расплав-литейная форма», показывает, что к основным факторам образования пригара и других поверхностных дефектов необходимо отнести деформацию и разрушение приповерхностных слоев литейной формы в период заливки и кристаллизации расплава. Исследователи связывают эту причину с различными теплофизическими процессами (например, ударным характером испарения влаги, возникновением нелинейных растягивающих и сжимающих напряжений, в том числе и при расширении кварцевого песка и др.).



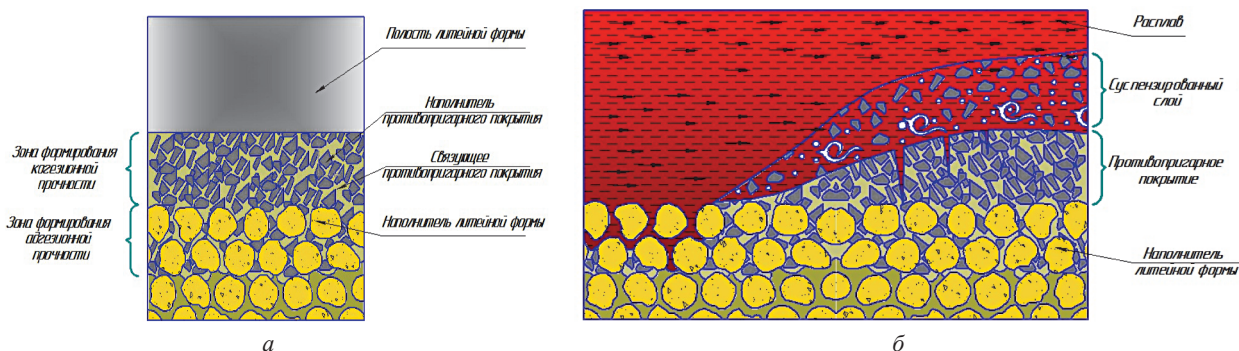


Рис. 2. Схема разрушения противопригарного покрытия при высокотемпературном взаимодействии: а – до взаимодействия с расплавом; б – в период взаимодействия с расплавом

В то же время деформация и разрушение приповерхностных слоев литейной формы (опорной основы противопригарного покрытия) является одной из причин разупрочнения. Механизм разупрочнения противопригарного покрытия и динамика образования пригара в период взаимодействия с расплавом могут быть представлены следующим образом. До заполнения литейной формы расплавом (рис. 2, а) прочность противопригарного покрытия обеспечивается суммарной адгезионной прочностью контактов связующего и наполнителя и когезионной прочностью связующего. Однако в период заполнения литейной формы (рис. 2, б) температура ее поверхности, в том числе и противопригарного покрытия, резко повышается до температур, близких к температуре заливки, что приводит к возникновению термических напряжений, также к деструкции органического связующего (потеря когезионной прочности) и разупрочнению противопригарного покрытия (разрушение адгезионных контактов). Учитывая то, что расплав движется, частички наполнителя противопригарного покрытия вовлекаются в поток. При этом так как скорость движения расплава значительно превышает скорость смачивания поверхности, то в приповерхностном слое образуется «суспензированный» слой расплава, в котором зарождаются вихри и активно действующие кавитационные полости, интенсифицирующие процесс разрушения покрытия. Через оголенную поверхность литейной формы под действием сил капиллярного всасывания начинается фильтрация расплава и активное протекание химических реакций взаимодействия оксидов расплава с наполнителем литейной формы с образованием «цементирующих» соединений. Под действием этих процессов формируется слой отливки, поверхность которого в основном повторяет макро- и микрогеометрию поверхности литейной формы [20].

Важно отметить, что авторами, исследовавшими теплофизические причины образования дефектов поверхности отливок, установлено, что лучшие результаты в профилактике дефектов поверхности могут быть достигнуты при использовании высокотермостойких и эрозионностойких противопригарных покрытий с низким коэффициентом температуропроводности и высокой теплоаккумулирующей способностью. Эти физические параметры в первую очередь зависят от природы применяемых в составах противопригарных покрытий наполнителей и микроструктуры покрытий.

Таким образом, проведенный комплексный анализ известных результатов и практических исследований показывает, что пригар – это дефект отливок, образующийся в результате сложных совмещенных термохимических, теплофизических и гидродинамических процессов, протекающих в контактной зоне «расплав–литейная форма».

Вероятность образования пригара на поверхности отливок определяется такими взаимосвязанными факторами, как химический состав и степень раскисления расплава, его вязкость, жидкотекучесть и поверхностное натяжение. С другой стороны, развитие процесса образования пригара определяется термостойкостью, химическим и гранулометрическим составом наполнителей противопригарных покрытий и формовочных смесей. Кроме того, такие факторы, как металлостатическое давление, атмосфера в литейной форме в период заливки, а также длительность заливки существенно влияют на образование пригара и прочность сцепления его с отливкой.

### Литература

1. Васин Ю. П. Современные тенденции борьбы с пригаром на стальных и чугунных отливках / Ю. П. Васин // Получение отливок с чистой поверхностью. Киев: РДЭНТП, 1976. С. 5–6.
2. Васин Ю. П. Окислительные смеси в конвейерном производстве стального литья / Ю. П. Васин, З. Я. Иткин. Челябинск: Южно-Уральск. кн. изд-во, 1973. 154 с.

3. Д о р о ш е н к о С. П. Получение отливок без пригара в песчаных формах / С. П. Дорошенко, В. Н. Дробязко, К. И. Ващенко. М.: Машиностроение, 1978. 208 с.
4. Д о р о ш е н к о С. П. Предотвращение пригара на отливках. Теория и практика / С. П. Дорошенко и [др.] // Литейное производство. 1996. № 2. С. 20–21.
5. В а л и с о в с к и й И. В. Пригар на отливках / И. В. Валисовский. М.: Машиностроение, 1983. 192 с.
6. В а л и с о в с к и й И. В. Исследование некоторых поверхностных явлений на границе раздела жидкий металл – литейная форма / И. В. Валисовский // Сб. науч. тр. ЦНИИТМАШ. М., 1960. № 6. С. 56–57.
7. Влияние химического состава Fe-C-сплавов на прочность пригара / И. В. Валисовский и [др.] // Литейное производство. 1976. № 6. С. 31–33.
8. Р о м а н о в О. Б. Теория и технология получения отливок без пригара: Дис. .... д-р. техн. наук. Ташкент, 1993. 174 с.
9. Р а т у ш Н. Г. Противопригарные быстровысыхающие покрытия в литейном производстве / Н. Г. Ратуш. М.: НИИЭИ-ФОРМЭНЕРГОМАШ, 1982. 35 с.
10. С и д о р о в Н. М. Исследование влияния газовой среды на качество поверхности стальных отливок / Н. М. Сидоров, В. А. Васильев // Получение отливок с чистой поверхностью. Киев: РДЭНТП, 1976. С. 9–10.
11. П о н о м а р е в А. К. Формовочная краска для улучшения качества поверхности стальных отливок / А. К. Пономарев // Литейное производство. 1965. № 11. С. 39.
12. Противопригарное покрытие для литейных форм и стержней: а. с. SU 1822355 A3. 1993 / Е. А. Белобров, В. И. Ковалев, В. С. Олейник, О. Л. Карпенкова.
13. Наполнитель и связующее для противопригарных покрытий: а. с. SU 1357116 A1. 1987 / Л. Н. Козлов, В. И. Черников, И. М. Распопин, Ю. С. Тонких, Г. К. Коптев.
14. Формовочные материалы и технология литейной формы / С. С. Жуковский [и др.]. М.: Машиностроение, 1993. 431 с.
15. Прочность литейной формы / С. С. Жуковский [и др.]. М.: Машиностроение, 1989. 288 с.
16. П е т р и ч е н к о А. М. Влияние связующих материалов на чистоту поверхности отливок / А. М. Петриченко, О. Г. Карташевская, В. В. Парфенова // Прогрессивные методы изготовления литейных форм. Челябинск: ЧПТИ, 1973. С. 3.
17. П о м е р а н е ц А. А. Термозащитные покрытия для форм и стержней / А. А. Померанец // Контроль качества и меры предупреждения дефектов отливок. М.: МДНТП, 1977. С. 51–54.
18. П е т р и ч е н к о А. М. Термостойкость литейных форм / А. М. Петриченко, А. А. Померанец, В. В. Парфенова. М.: Машиностроение, 1982. 232 с.
19. В а с и л ь е в В. А. Формирование чистоты поверхности отливок в песчано-глинистых формах / В. А. Васильев, В. П. Кузнецов // Машины и автоматизация литейного производства: Тр. МВТУ. М.: МВТУ, 1975. № 187. С. 55–78.
20. В е й н и к А. И. Расчет отливки / А. И. Вейник. М.: Машиностроение, 1964. 403 с.
21. Ц и б р и к А. Н. Физико-химические процессы в контактной зоне металл-форма / А. Н. Цибрик. Киев: Наукова думка, 1977. 211 с.

## References

1. V a s i n J. P. Sovremennye tendencii bor'by s prigarom na stal'nyh i chugunnyh otlivkakh [Modern trends of the burn-in prevention on the steel and iron castings]. *Poluchenie otlivok s chistoj poverhnost'ju* [Obtaining the casts with clean surface], Kiev, 1976, pp. 5–6.
2. V a s i n J. P., I t k i s Z. J. Okislitel'nye smesi v konvejernom proizvodstve stal'nogo lit'ja [Oxidant mixture in the steel castings conveyor production]. Chelyabinsk, South-Ural Publ., 1973. 154 p.
3. D o r o s h e n k o S. P., D r o b j a z k o V. N., V a s h e n k o K. I. *Poluchenie otlivok bez prigara v peschanyh formah* [Obtaining the castings in the sand molds without burn-in]. Moscow, Machinebuilding Publ., 1978. 208 p.
4. D o r o s h e n k o S. P. Predotvrashhenie prigara na otlivkakh. Teoriya i praktika [Prevention of burn-on castings. Theory and practice]. *Foundry production*, 1996, no. 2, pp. 20–21.
5. V a l i s o v s k i j I. V. *Prigar na otlivkakh* [Burning-on castings]. Moscow, Machinebuilding Publ., 1983. 192 p.
6. V a l i s o v s k i j I. V. Issledovanie nekotoryh poverhnostnyh javlenij na granice razdela zhidkij metall – litejnaja forma [Investigation of some surface phenomena at the interface between the liquid metal – mold]. *Sbornik nauchnyh trudov CNIITMASH* [Scientific papers collection of the CNIITMASH]. Moscow, 1960, no. 6, pp. 56–57.
7. V a l i s o v s k i j I. V. Vlijanie himicheskogo sostava Fe-C-splavov na prochnost' prigara [The influence of the chemical composition of Fe-C alloys on the burn-on strength]. *Foundry production*, 1976, no. 6, pp. 31–33.
8. R o m a n o v O. B. Teoriya i tehnologija poluchenija otlivok bez prigara. *Diss. dokt. tehn. nauk* [Theory and technology of the casts producing without burn-on. *Dr. tech. sci. diss.*]. Tashkent, 1993. 174 p.
9. R a t u s h N. G. *Protivoprigarnye bystrovysyhajushhie pokrytija v litejnom proizvodstve* [Quickly dries refractory coatings in the foundry production]. Moscow, NIIFORMENERGOMASH Publ., 1982, 35 p.
10. S i d o r o v N. M., V a s i l ' e v V. A., S i d o r o v N. M. Issledovanie vlijanija gazovoj sredy na kachestvo poverhnosti stal'nyh otlivok [Investigation of the gas medium influence on the steel castings surface quality]. *Poluchenie otlivok s chistoj poverhnost'ju* [Obtaining the casts with clean surface], Kiev, 1976, pp. 9–10.
11. П о н о м а р е в А. К. Формовочная краска для улучшения качества поверхности стальных отливок [Refractory coating for increase the casting surface quality]. *Foundry production*, 1965, no. 11, p. 39.
12. B e l o b r o v E. A., e. a. Protivoprigarnoe pokrytie dlja litejnyh form i sterzhnej [Refractory coating for foundry moulds and cores]. *Patent USSR, no. SU 1822355 A3, 1993.*
13. K o z l o v L. N., e. a. Napolnitel' i svjazujushhee dlja protivoprigarnykh pokrytij [Filler and binder for refractory coating]. *Patent USSR, no. SU 1357116 A1, 1987.*
14. Z h u k o v s k i j S. S. *Formovochnye materialy i tehnologija litejnoj formy* [Foundry molding materials and technology of the foundry mold]. Moscow, Machine building Publ., 1993. 431 p.

15. Zhukovskij S. S. *Prochnost' litejnoj formy* [The foundry mold strength]. Moscow, Machine building Publ., 1989. 288 p.
16. Petrichenko A. M., Kartashevskaja O. G., Parfenova V. V. Vlijanie svjazujushhikh materialov na chistotu poverhnosti otlivok [The binders influence on the finish castings surface]. *Progressivnye metody izgotovlenija litejnyh form otlivok* [Progressive methods of foundry molds making]. Chelyabinsk, ChPTI Publ., 1973. p. 3.
17. Pomeranec A. A. Termozashhitnye pokrytija dlja form i sterzhnej [Thermal protection refractory coatings for foundry molds and cores]. *Kontrol' kachestva i mery preduprezhdenija defektov otlivok* [Quality control and measures to prevent of the castings defects] MDNTP Publ., 1977. pp. 51–54.
18. Petrichenko A. M., Pomeranec A. A., Parfenova V. V. *Termostojkost' litejnyh form* [Foundry molds thermal stability]. Moscow, Machine building Publ., 1982. 232 p.
19. Vasil'ev V. A. Formirovanie chistoty poverhnosti otlivok v peschano-glinistyh formah [Castings cleanliness surface formation in sand-clay foundry forms]. *Trudy MVTU «Mashiny i avtomatizacija litejnogo proizvodstva»* [Proc. of the Bauman MSTU «Machinery and automation of the foundry production»]. Moscow, MSTU Publ., 1975, no. 11, pp.55–78.
20. Vejniki A. I. *Raschet otlivki* [Casting calculation]. Moscow, Machine building Publ., 1964, 403 p.
21. Cibrik A. N. *Fiziko-himicheskie processy v kontaktnoj zone metall-forma* [Physical-chemical processes in the contact zone of metal-mold]. Kiev, Scientific thought Publ., 1977, 211 p.

#### **Сведения об авторах**

*Николайчик Юрий Александрович*, канд. техн. наук, Белорусский национальный технический университет, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости 65, yuni@bntu.by.

*Рудницкий Федор Иванович*, канд. техн. наук, Белорусский национальный технический университет, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости 65. E-mail: stl\_minsk@tut.by.

#### **Information about the authors**

*Nikolaichik Y.*, Belarusian National Technical University, 65 Nezavisimosti Pr., Minsk, 220113, Republic of Belarus. E-mail: yuni@bntu.by.

*Rudnicki F.*, Belarusian National Technical University, 65 Nezavisimosti Pr., Minsk, 220113, Republic of Belarus. E-mail: stl\_minsk@tut.by.