



УДК 621.74:669.13

Поступила 05.03.2018

ПРОСЕЧКИ НА ПОВЕРХНОСТИ ЧУГУННЫХ ОТЛИВОК

О. С. КОМАРОВ, Е. В. РОЗЕНБЕРГ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: komarov_metolit@tut.by,
А. Н. КАРАСЬ, А. М. НЕВМЕРЖИЦКИЙ, А. Н. АПАНАСЕВИЧ, ОАО «Минский тракторный завод», г. Минск, Беларусь, ул. Долгобродская, 29.

Исследован механизм образования просечек на чугунных отливках, стержни которых изготовлены из холоднотвердеющей смеси. Показано, что причиной образования просечек являются напряжения в поверхностном слое стержня, возникающие при превращении α -кварца в α -тридимит. Проверена возможность уменьшения количества и размеров просечек за счет подбора состава красок и толщины их слоя на поверхности стержней.

Ключевые слова. Просечки, литейная краска, напряжения в стержне.

Для цитирования: Комаров, О. С. Просечки на поверхности чугунных отливок / О. С. Комаров, Е. В. Розенберг, А. Н. Карась, А. М. Невмержицкий, А. Н. Апанасевич // Литье и металлургия. 2018. Т. 91. № 2. С. 37–42.

PERFORATIONS ON THE SURFACE OF IRON CASTINGS

O. S. KOMAROV, E. V. ROZENBERG, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: komarov_metolit@tut.by,
A. N. KARAS, A. M. NEUMIARZHYSKI, A. N. APANASEVICH, OJSC «Minsk Tractor Works», Minsk, Belarus, 29, Dolgobrodskaya str.

The mechanism of the formation of veinings on cast iron castings whose cores are made of a cold-hardening mixture is studied. It is shown that the cause of the formation of the veinings are the stresses in the surface layer of the core that arise when α -quartz is converted to α -tridymite. The possibility of reducing the number and size of veinings due to the selection of the composition of paints and the thickness of their layer on the surface of the rods was tested.

Keywords. Veining, casting paint, stresses in the core.

For citation: Komarov O. S., Rosenberg E. V., Karas A. N., Neumiaryzhytski A. M., Apanasevich A. N. Perforations on the surface of iron castings. Foundry production and metallurgy, 2018, vol. 91, no. 2, pp. 37–42.

Просечки – это обычно протяженные узкие выступы на поверхности отливок, образующиеся в результате растрескивания контактирующей с расплавленным металлом поверхности форм и стержней и затекания в трещины металла. Растрескивание форм и стержней происходит в связи с термическим расширением кварцевого песка при нагревании и в результате полиморфных превращений в кварце. Считается, что увеличение объема наполнителя формовочной или стержневой смеси на контактирующей с расплавом поверхности вызывает появление механических напряжений, приводящих к растрескиванию смеси.

В основе механизма образования просечек лежит свойство кварца претерпевать полиморфные превращения в процессе нагревания: α -кварц при 574 °С превращается в β -кварц с уменьшением объема на 0,8%, а при 870 °С образуется α -тридимит с объемным расширением 14,7%. На объемные расширения, вызванные фазовыми превращениями, накладываются термические расширения, что создает напряжения в поверхностном слое стержня, контактирующим с жидким расплавом, в результате чего происходят растрескивание и разрушение этого слоя стержня. Схема образования просечек представлена на рис. 1.

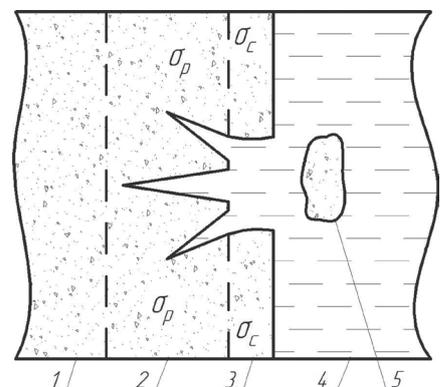


Рис. 1. Схема образования просечки: 1 – стержень; 2 – слой стержня с температурным интервалом 574–870 °С; 3 – слой стержня с температурным интервалом 870–1350 °С; 4 – расплавленный металл; 5 – фрагменты стержня или краски; σ_c – сжимающие напряжения; σ_p – растягивающие напряжения

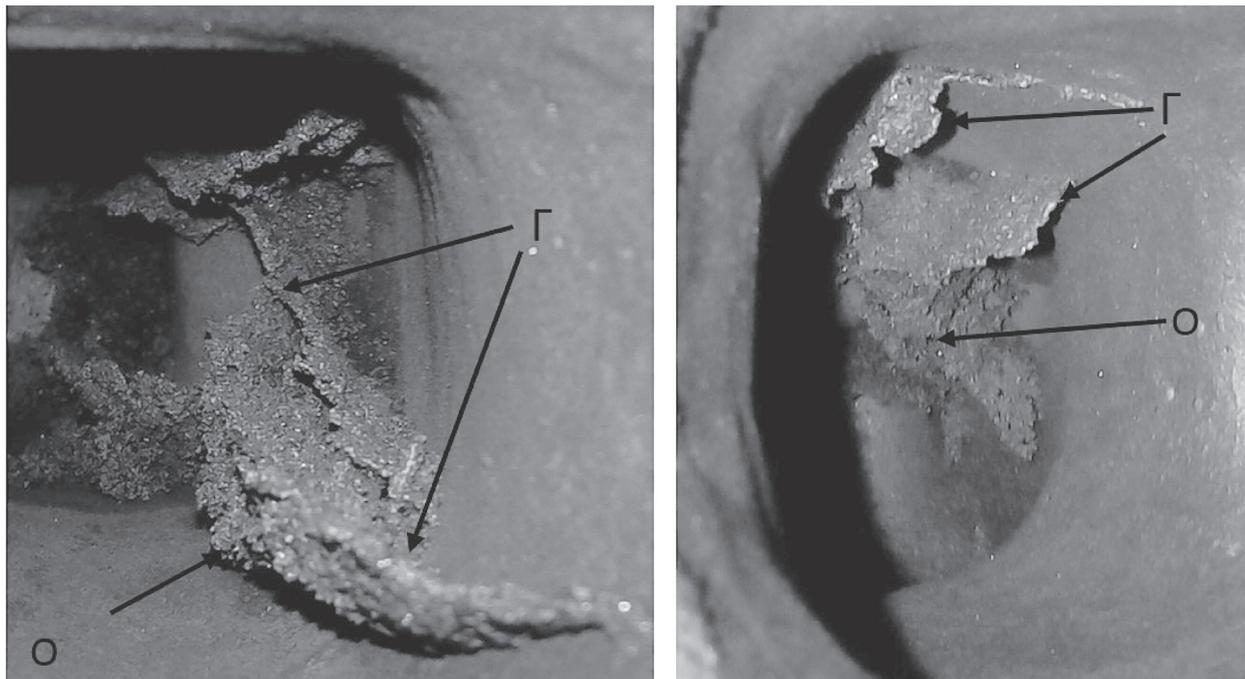


Рис. 2. Внешний вид просечки

Поверхность стержня можно условно разделить на несколько слоев с различной температурой прогрева в момент времени снятия перегрева залитого в форму металла. В слое при температурах в интервале 574–870 °С (рис. 1) образуются растягивающие напряжения σ_p за счет превращения α -кварца в β -кварц с уменьшением объема на 0,8%, что вызывает образование тонких трещин, а в слое стержня 3 (рис. 1), где температура превышает 870 °С, возникают сжимающие напряжения σ_c при образовании α -тридимита, приводящие к разрушению поверхностного слоя. Таким образом, просечка может состоять из двух частей: основания, образовавшегося при разрушении слоя 3, и «короны» из тонких гребешков, образовавшихся при растрескивании слоя 2.

На рис. 2 показан внешний вид типичных просечек, форма которых подтверждает приведенные выше соображения о возможном механизме их образования. Стрелкой «О» отмечено основание просечки, а стрелками «Г» – короны или гребень.

Для расчета ширины зон 2 и 3 (рис. 3) к моменту снятия перегрева расплавленного металла, после чего образование просечек невозможно, можно использовать методику, приведенную в работе [1]. В расчетах использовали продолжительность заливки τ_1 , с; к концу заливки температура поверхности стержня равна температуре расплавленного металла (1300 °С). Отливку считаем плоской. Время снятия перегрева τ_2 может быть рассчитано по формуле:

$$\tau_2 = \frac{(n+1)}{n} \left(\frac{Rp_1c_1}{b_2} \right)^2 \frac{T_3 - T_k}{T_3 + T_k} \left(\frac{q_{\text{теч}}}{C_1T_k} + \frac{T_3}{T_k} - 1 \right) + \tau_1, \quad (1)$$

где τ_2 – время снятия перегрева, с; n – показатель параболы: $n = 3$ [1]; R – приведенный размер отливки (1/2 толщины стенки), $2R = 15$ мм; τ ; ρ_1 и c_1 – соответственно плотность и теплоемкость расплава: $\rho_1 = 7000$ кг/м³; $c_1 = 838$ Дж/(кг·°С); $b_2 = \sqrt{p_2c_2\lambda_2}$ – коэффициент аккумуляции тепла материалом формы ($b_2 = 1265$ Вт·С^{0,5}/(м²·°С)); T_3, T_k – температура заливки и кристаллизации металла: $T_3 = 1300$ °С; $T_k = 1130$ °С; λ_2 – коэффициент теплопроводности материала стержня (0,8 Вт/(м·°С)); $q_{\text{теч}}$ – удельная теплота, полученная формой (стержнем) за время заливки:

$$q_{\text{теч}} = \sqrt{\frac{2n}{n+1} \frac{b_2T_3}{Rp_1}} \sqrt{\tau_1}. \quad (2)$$

Подставляя значения в формулы (1) и (2) и производя расчеты, получаем: $\tau_2 = 14,4 + \tau_1$.
Принимаем $\tau_1 = 7$ с, тогда глубина прогрева формы составит:

$$x = \sqrt{2n(n+1)a_2\tau_2} = 4,5 \text{ мм}, \quad (3)$$

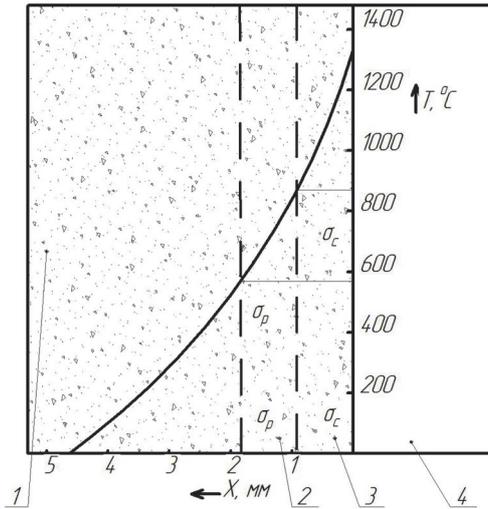


Рис. 3. Схема распределения температур и напряжений в стержне: 1 – стержень; 2 – слой стержня с температурным интервалом 574–870 °С; 3 – слой стержня с температурным интервалом 870–1350 °С; 4 – расплавленный металл; σ_c – сжимающие напряжения; σ_p – растягивающие напряжения

где

$$a_2 = \frac{\lambda_2}{c_2 \rho_2}, \tag{4}$$

здесь ρ_2 и c_2 – соответственно плотность и теплоемкость материала стержня: $\rho_2 = 1500 \text{ кг/м}^3$; $c_2 = 800 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{°С)}$.

На рис. 3 приведена схема распределения температур T в слое x стержня, прилегающем к поверхности отливки к моменту затвердевания поверхностного слоя металла отливки.

По мере прогрева в интервале 574–870 °С в поверхностном слое стержня вначале возникают растягивающие напряжения σ_p , которые могут привести к образованию трещин. При увеличении температуры свыше 870 °С происходит расширение, что вызывает скалывание и разрушение поверхностного слоя стержня. Образующиеся фрагменты стержня удаляются в расплавленный металл, создавая углубления в стержне, куда затекает металл, в результате чего на поверхности отливки формируется выступ просечки.

Приблизительную оценку величины напряжений, возникающих в зоне 3, можно установить, используя методику, предложенную для расчета напряжений в песчаных грунтах [2]:

$$\sigma = E_0 \alpha (T - T_0) + E_0 \alpha_a, \tag{5}$$

где σ – напряжение в поверхностном слое, МПа; α – коэффициент термического расширения песка, $1/\text{°С}$: $\alpha = 1 \cdot 10^{-6} \text{ 1/°С}$; T – температура поверхности стержня: $T = 1300 \text{ °С}$; T_0 – исходная температура: $T_0 = 20 \text{ °С}$; E_0 – модуль общей деформации, МПа: $E_0 = 60 \text{ МПа}$; α_a – коэффициент линейного расширения за счет полиморфного превращения α -кварца в α -тридимит: $\alpha_a = 0,05$.

Подставляя значения в формулу (5), получаем

$$\sigma = 60 \cdot 10^{-6} \cdot 1300 + 60 \cdot 0,05 = 0,07 + 3 \approx 3 \text{ МПа.}$$

Приведенные расчеты показывают, что термические напряжения можно не учитывать, так как их величина на два порядка меньше напряжений, образующихся за счет полиморфного превращения материала стержня.

Для предотвращения образования просечек необходимо исключить прогрев поверхностного слоя стержня до температуры свыше 870 °С к моменту снятия перегрева расплавленного металла за счет нанесения слоя краски на поверхность стержня.

В цехе серого чугуна ОАО «МТЗ» взамен стержневой краски «Hydro» начали использовать краску российского производства, которая обеспечивает получение покрытия на стержне порядка 0,5–0,6 мм. Количество просечек резко сократилось, но они не устранены полностью.

Были рассмотрены три возможных направления, позволяющих снизить вероятность образования просечек. Первое основано на стремлении уменьшить напряжения, вызванные полиморфными превращениями в смеси, для чего в ее состав вводили добавки с низким коэффициентом термического расширения (циркон, муллитовые шарики и др.). В соответствии со вторым направлением в состав смеси вводят органические материалы (древесную муку, крахмал и др.), которые, выгорая, под действием высоких температур, создают микропустоты, способствующие снятию напряжений в смеси, компенсируя увеличение объема материала стержня. Третье направление предполагает введение в состав смеси добавок типа оксидов железа, титана или лития, которые при высоких температурах взаимодействуют с кварцем, изменяя склонность смеси к фазовым превращениям и связанными с ними изменениями объемов.

У каждого из этих методов есть свои недостатки. Добавка циркона ведет к удорожанию смеси и, в конечном итоге, увеличивает стоимость отливки. Органические добавки повышают газотворность смеси и отрицательно сказываются на ее прочности. Флюсующие добавки приводят к образованию пригара и, накапливаясь в оборотной смеси, снижают ее качество.

В связи с этим сделана попытка снизить количество просечек на отливках «головка блока» и «турбинка», выпускаемых на МТЗ, за счет изменения состава стержневой краски. Стержни обеих деталей изготавливаются в холодных ящиках (cold-box). Стержни головки блока окрашивали краской «Hydro»,

фирма «Furtenbach», а стержень турбинки окраске не подлежал. Проведено несколько серий экспериментов (см. таблицу).

Опыты на ОАО «МТЗ» (цех серого чугуна) по ликвидации просечек (головки блока)

Номер серии эксперимента	Состав краски		Результат
	однослойное покрытие	двухслойное покрытие	
1	Zr 50 + Аю·6		Существенных отличий от окраски «Hydro» не замечено
2	Zr 40 + Г10 + Аю·6		
3	АХФ 10 + Zr60		
4	АХФ 10 + ДС50		
5	АХФ 10 + Zr 45 + Г15		
6	Zr20 + ДС20 + Г15 + Аю6		
7	К40 + Г15 + Д10 + Аю6		
8	ДС40 + Г15 + Na ₂ CO ₃ 4 + Аю6		
9	Zr20 + ДС20 + Г15 + Аю6	Zr20 + ДС20 + Г + Аю6	Лучше, чем при нанесении двух слоев краски «Hydro», но просечки встречаются
10	Г15 + ДС10 + К40 + Аю6	Г15 + ДС20 + К15 + Аю6	
11	Г20 + Cu20 + Аю6	Г15 + Cu20 + Аю6	
12	Hy + Cu20	Hy + 20Cu	Просечек мало, но они встречаются
13	Zr40 + ДС20 + Аю6	ДС10 + Hy + Cu15	
14	Zr40 + ДС20 + Аю6	Г7 + Hy	
15	Hy+ Cu15	Zr60 + Аю6	
16	Hy+ Fe20	Zr60 + Аю6	
17	Hy + Кр2	Zr60 + Аю6	
18	Hy+ FeO15 + С4	Zr60 + Аю6 + Кр2	Краска загустевает
19	Zr60 + Аю6 + Кр3	ЛС4 +Г20	Есть просечки, краска густая
20	Zr60 + Аю6 + Кр3	FeO10 + Г5 + Hy	
21	PK + Оп6	ДС60_ Аю6	Встречаются отдельные просечки
22	PK+Оп5	Zr60 +Оп5 +Аю6	
23	PK	»	

Пр и м е ч а н и е. Zr – циркон; Аю – алюминат натрия; ДС – дистенсилиманит; К – корунд (Al₂O₃); Hy – «Hydro»; АХФ – алюмохромфосфат; Г – графит; Кр – крахмал; Оп – опилки; Д – доломит; РК – Российская краска; ЛС – лигносульфонат. Цифры после букв указывают на процентное содержание компонента в краске.

Первая серия экспериментов (опыты № 1–5) проведена с целью проверки влияния теплопроводности наполнителя краски на образование просечек. Исходили из предположения, что использование наполнителя с высокой теплоемкостью и теплопроводностью ускорит процесс образования корки твердого металла вблизи поверхности стержня и сделает невозможным затекание жидкого расплава в трещины в стержнях. Кроме того, применение алюмината натрия и алюмохромфосфата в качестве связующих, обладающих высокой прочностью при высоких температурах, должно препятствовать растрескиванию поверхностного слоя краски и стержня. В связи с этим в качестве наполнителей краски использовали графит и циркон, а в качестве связующего – алюминат натрия и алюмохромфосфат.

Цель второй серии экспериментов (опыты № 6–8) – создать на границе стержень-расплав чугуна барьер из газов, которые замедлили бы теплопередачу от металла к стержню и снизили температуру на поверхности стержня. Для этого в состав краски вводили доломит (MgCO₃·CaCO₃) и натриевую соду (Na₂CO₃), которые, разлагаясь под действием высоких температур, создали бы газовый барьер. Но интенсивность разложения при температурах прогрева верхнего слоя стержня, когда образуются трещины, оказалась недостаточной и существенного влияния на образование просечек не наблюдали.

Во всех последующих экспериментах пытались защитить стержень от быстрого нагрева за счет увеличения толщины покрытия краской (наносили два слоя с сушикой стержня после нанесения каждого) и варьирования составами с целью снижения теплопроводности, образования газового барьера (крахмал, опилки, смесь FeO + C) или ускорения образования корки твердого металла (порошок Fe и Cu в составе краски).

Применение двухслойного покрытия стержня и различных вариантов наполнителей обеспечивало уменьшение числа просечек на 80–90%, но они оставались.

Российская краска (Акропал 78–90 К) обеспечивает получение толстого покрытия, что существенно сокращает число и размер просечек. Нанесение двух слоев позволило практически устранить их полно-

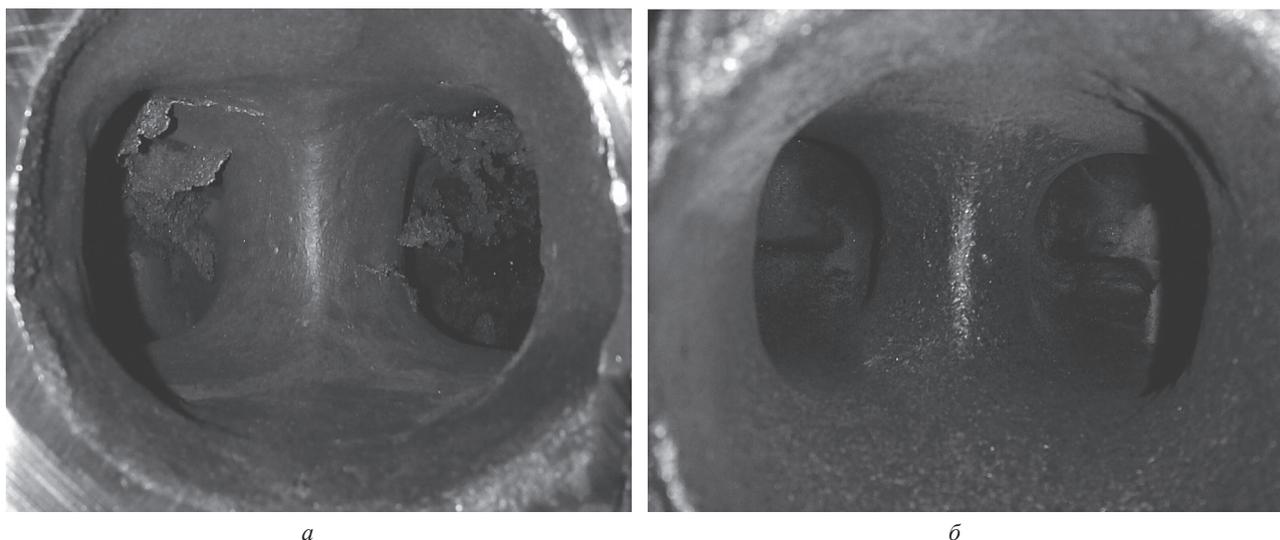


Рис. 4. Просечки на отливках при использовании краски «Hydro» (а) и двухслойного покрытия (б)



Рис. 5. Вид внутренней поверхности отливки: а – стержень не окрашен; б – стержень окрашен

стью, но толстое покрытие стержня затрудняет его установку и увеличивает размер внутренних полостей. Тем не менее, добавка в ее состав ряда компонентов и нанесение второго слоя других красок положительно сказывается на ее эффективности.

На рис. 4 приведены фотографии внутренних полостей головки блока при применении краски «Hydro» и двухслойной краски. Первый слой состоял из 20% циркона, 2% крахмала и 6% 50%-ного раствора NaAlO_2 , а второй слой на основе краски «Hydro» с добавкой 10% FeO и 5% графита.

Во втором случае наблюдали не только резкое уменьшение количества просечек, но и повышение чистоты поверхности. Снижение количества просечек связано как с совершенствованием состава краски, так и с увеличением ее толщины.

Просечки на внутренней поверхности отливки турбины были устранены окраской стержня. Наилучший эффект получен при использовании краски на основе циркона (50%) со связующим алюминатом натрия. На рис. 5 показана внутренняя поверхность турбин, стержень которых не окрашен и после окраски.

Таким образом, в порядке обсуждения проблемы повышения качества чугунных отливок предложен вариант механизма образования просечек и исследована возможность существенного снижения их количества за счет совершенствования состава краски и увеличения толщины ее слоя. Проведенные исследования показали, что увеличение толщины покрытия краски за счет повышения ее вязкости или нанесения нескольких слоев более эффективно в борьбе с дефектами «просечка», чем подбор сложных комбинаций компонентов наполнителя краски.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Анисович Г. А.** Затвердевание отливок / Г. А. Анисович. Минск: Наука и техника, 1979. 232 с.
2. **Домбровский Н. Г.** Строительные машины / Н. Г. Домбровский, Ю. Л. Картелишвили, М. И. Гальперин. М.: Машиностроение, 1976. 391 с.

REFERENCES

1. **Anisovich G. A.** *Zatverdevanie otlivok* [Curing of castings]. Minsk, Nauka i tehnika Publ., 1979. 232 p.
2. **Dombrovskij N. G., Kartelishvili Ju. L., Gal'perin M. I.** *Stroitel'nye mashiny* [Construction machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 391 p.

ПОЗДРАВЛЯЕМ!

С ПРИСУЖДЕНИЕМ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК



СЕРГЕЯ ЛЕОНИДОВИЧА РОВИНА

Редакция журнала «Литье и металлургия»,
Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь
горячо и сердечно поздравляют Вас.

Примите от нас, Сергей Леонидович, самые искренние поздравления
и самые добрые пожелания.

Желаем Вам дальнейших творческих успехов, крепкого здоровья,
благополучия в жизни.