

УДК 621.74.002: 669.001.2

- О.А. Бройтман (ООО «Сименс», С.-Петербург)
- O.A. Broytman

Изготовление крупных кузнечных слитков без осевых усадочных дефектов в измененной изложнице

Modified Mould Design for Production of Large Scale Steel Forging Ingots without Centerline Weakness

Типичная проблема качества кузнечных слитков – осевая усадочная рыхлота, возникновение которой связано с невозможностью поддержания направленного режима затвердевания на протяжении всего периода формирования литой заготовки. На практике следует стремиться к исключению рыхлот в теле слитка, поскольку даже умеренная пористость может не полностью устраняться при ковке в силу возможных ограничений усилий прессования.

В отсутствие специальных воздействий качество крупного слитка, в частности, склонность к появлению осевой рыхлоты (типично, под уровнем $3/4 \dots 1/2$ от высоты слитка) в решающей степени определяется его конфигурацией. Действие прибыли неминуемо распространяется на ограниченную глубину [1, 2], а сколь угодно эффективное утепление часто позволяет лишь снизить её металлоемкость за счет сокращения высоты, но не способно надёжно предотвратить образование рыхлот в заглубленных частях слитка. Зачастую избежать неблагоприятного режима затвердевания можно, лишь изменив геометрию тела слитка – увеличением конусности и уменьшением соотношения высоты к характерному диаметру H/D . Однако эта мера не согласуется с принципами экономического производства, поскольку приводит к значительным потерям металла при последующей механообработке заготовки. Регулировать теплоотвод от тела слитка во избежание появления осевой рыхлоты возможно также и посредством специальных воздействий, действующих с различной степенью эффективности. К примеру, нанесение неравномерного по высоте изложницы слоя огнеупорного покрытия, при безусловной дешевизне мероприятия, вряд ли надёжно решит проблему, а устройство систем подогрева и охлаждения раз-

Типичный дефект кузнечных слитков – осевая усадочная рыхлота, связанная с нарушением направленного режима затвердевания в процессе формирования литой заготовки. Предложено изменить конструкцию изложницы созданием в верхней её части карманов, которые заполняют теплоизоляционным материалом (литейным песком). Правильный выбор расположения карманов и теплоизолятора позволяет изменить теплоотвод от слитка таким образом, чтобы надёжно обеспечить соблюдение режима направленного затвердевания. Предложенное экономичное решение позволяет получать практически свободные от усадочных дефектов слитки за счёт управления режимом их затвердевания.

Ключевые слова

Стальной кузнечный слиток, осевая рыхлота, направленное затвердевание, изложница, компьютерное моделирование.

АННОТАЦИЯ

THE SUMMARY

The casting procedure usually leads to the so called centerline weakness that is caused by the non-unidirectional solidification within the ingot. It is proposed to modify the moulds for large scale steel ingots by adding cavities, also referred to as pockets, inside their upper parts. These cavities are then filled with a heat insulating material like for example usual foundry sand. A suitable positioning of these cavities as well as the suitable choice of filling materials leads to a change in the heat transfer from the ingot, allowing a safe unidirectional solidification. The proposed solution allows an economic and effective way of controlling the solidification process, thus allowing the cast of nearly defect-free heavy steel ingots.

Key words

Steel forging ingot, centerline weakness, unidirectional solidification, mould design, computer modeling.

ных частей оснастки будет действенно, но сильно усложнит и удорожит технологию.

Компьютерный анализ режимов затвердевания слитков, в которых условия питания осевой зоны очевидно неблагоприятны, привёл к предложению конструкции изложницы, которая способна в значительной мере модифицировать условия формирования литой заготовки [3]. Усовершенствованная изложница предполагает присутствие полости (кармана) в верхней её части, заполненной теплоизолирующим материалом, к примеру, обычным литейным песком. Эффективность применения изложницы новой конструкции подтвердили результаты численного моделирования формирования крупных кузнечных слитков в системе компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) «ПолигонСофт».

На **рис. 1, а (обложка)** приведена традиционная технология литья слитка массой 80 т, а на **рис. 1, б** – технология, предусматривающая присутствие в изложнице кармана, в котором находится кварцевый песок в состоянии свободной засыпки. Слиток изготавливают из стали 35ХНМ заливкой сверху в разогретую до температуры ~ 100°C оснастку из чугуна СЧ25. Характеристика геометрии слитка: $H/D = 1,9$, конусность на обе стороны 3,4%.

Согласно полуэмпирическим методикам проектирования технологии производства кузнечных слитков в традиционной оснастке [1], для условий $1,1 < H/D < 2,1$ конусность должна быть ~ 15% для надёжного предотвращения появления рыхлот, а значение в 4...5% указывается в качестве минимального. Следует признать, что склонность к возникновению осевой рыхлоты в рассматриваемом слитке весьма высока, хотя, с точки зрения расходования металла, конфигурация литой заготовки представляется оптимальной.

Приведённые выше оценочные прогнозы подтверждаются как практическим опытом изготовления слитка в изложнице традиционной конструкции, так и результатами моделирования (**рис. 2**). Пористость в осевой зоне составляет 0,5...2,0% по принятой в СКМ ЛП шкале (**рис. 2, а**). Наблюдение за ходом затвердевания (**рис. 2, б**) позволяет отследить динамику развития усадки в теле слитка. Первоначально зона сосредоточения жидкой фазы имеет благоприятную форму расширяющегося кверху конуса, по краям которого располагается двухфазная область, но затем его конфигурация нарушается, и через ~ 9...10

ч становится очевидным нарушение принципа направленного затвердевания – неблагоприятные условия питания осевой зоны приводят к её одновременному затвердеванию.

В случае применения изложницы измененной конструкции с заполненными песком карманами результаты прогноза усадки (**рис. 3, а**) и условий питания слитка (**рис. 3, б**) приобретают иной вид. Утепление верха изложницы позволяет снизить интенсивность теплоотвода от подприбыльной части и за счёт этого модифицировать конфигурацию зоны сосредоточения жидкой фазы, которая сохраняет коническую форму практически все время затвердевания слитка, благодаря чему в нем не обнаруживается сколько-либо существенной усадочной рыхлоты.

С применением изложницы модернизированной конструкции удалось добиться удовлетворительного качества 80-т слитка при сохранении его конфигурации, потенциально неудачной, с точки зрения традиционных принципов разработки литейной технологии. Метод решения проблемы достаточно дешёв, а выход годного высок в силу тех же особенностей геометрии слитка. Полное время затвердевания слитка не претерпело существенного увеличения и составило ~ 17, против 16 ч по традиционной технологии. Расчёты показали, что в случае применения усовершенствованной технологии нет необходимости увеличивать время до извлечения слитка из изложницы (изначально ~ 22 ч), поскольку температуры как на поверхности, так и внутри твёрдого металла слитка, близки к тем, что наблюдали при его изготовлении по традиционной технологии.

Для каждого нового слитка размеры карманов в изложнице, места их размещения целесообразно уточнять компьютерным моделированием, равно как и подбирать заполняющий их теплоизолятор. В зависимости от конфигурации и массы слитка есть риск как недостаточно эффективной работы карманов, так и избыточного утепления, что может привести к формированию теплового узла в подприбыльной части.

Что касается стойкости изложницы, в конструкцию которой внесены изменения, способствующие повышению неравномерности прогрева её материала, то можно выделить проблему разгара (подплавления) рабочей поверхности изложницы [4]. Такое нарушение сплошности поверхности приводит к повышенной концентрации напряжений в поврежденных участках

и зарождению трещин. При производстве 80-т слитка традиционной технологией разгар не наблюдается вовсе, но при использовании модернизированной изложницы отмечается склонность к повреждению металла изложницы в верхней её части. Выявленные моделированием перегретые участки поверхности изложницы требуют нанесения увеличенного слоя огнеупорного покрытия. В отдельных случаях могут быть пересмотрены конфигурация и расположение кармана, а также заменён заполняющий его материал.

Анализ напряжённо-деформированного состояния показал, что модернизированная изложница испытывает повышенные температурные напряжения, в сравнении с изложницей традиционной конструкции. Исследовали весь цикл работы изложниц, в том числе 40-ч охлаждение на воздухе после извлечения слитка.

По мере нагревания хрупкого материала изложницы после заливки расплава в нём протекают фазовые превращения, сопровождаемые приобретением пластических свойств [5] и непрерывным снижением предела текучести. После извлечения слитка наступает опасный этап эксплуатации изложницы, с точки зрения возникновения повышенных температурных напряжений (исследовали неблагоприятные условия, когда остывание изложницы на воздухе не замедляется путём установки теплоизолирующих крышек и т. п.). Одновременно с ростом напряжений в материале изложницы при охлаждении происходит его возвращение в упругое состояние.

На рис. 4 показаны остаточные напряжения в изложницах после полного охлаждения, в нижней части – визуализировано изменение геометрии относительно первоначального состояния (x100). При среднем уровне остаточных напряжений в 30...50 МПа, в некоторых участках на поверхности изложницы он достигает 120 МПа. Следует отметить, что предварительный разогрев оснастки перед следующей заливкой будет способствовать отпуску, и даже при прогреве изложницы после заливки нового слитка первоначально может несколько снижаться уровень остаточных напряжений.

Расчёты показали, что для обеих изложниц характерна склонность к возникновению трещин в местах стыка формирующих внутреннюю поверхность граней (напряжения часто близки к пределу прочности, который, однако, повышается при снижении температуры), а также в нижних участках этих граней. При работе с из-

менной изложницей возможно появление трещин на внешней и рабочей поверхностях, близких к дну кармана, поэтому при обслуживании такой оснастки следует уделять особое внимание мерам, замедляющим её остывание после извлечения слитка.

Предложенная модернизация технологии производства слитков имеет несомненные достоинства, заключающиеся в повышении качества продукции и выхода годного, однако требует тщательного контроля условий эксплуатации и обслуживания изложниц. Оптимальные технологические решения, позволяющие получать здоровые слитки при сохранении стойкости изложниц на протяжении большого числа циклов, целесообразно назначать с помощью компьютерного моделирования.

СПИСОК

ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назаратин В.В., Ромашкин А.Н., Иванов И.А., Мальгинов А.Н. Методика проектирования кузнечных слитков без осевых усадочных дефектов // *Металлургия машиностроения*. – 2010. – №3. – С. 40–52.
2. Бройтман О.А., Монастырский А.В., Иванов И.А., Мальгинов А.Н., Макарычева Е.В., Сараев А.Ю. Компьютерное моделирование процессов формирования крупных стальных кузнечных слитков // *Литейщик России*. – 2011. – №10. – С. 7-15.
3. Broymant O.A. New Mould Design for Production of High Quality Large Scale Steel Ingots // *Journal Technik Up2date*, 2012, April, №8.
4. Хлямов Н.А., Бройтман О.А. Моделирование затвердевания стальных слитков различной конфигурации // *Сб. Новые подходы к подготовке производства в современной литейной промышленности. Материалы научно-практического семинара*. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2005. – С. 50–57.
5. Ковалевич Е.В., Баранов Б.С., Урин С.А., Пантелеева А.В., Дубов А.А., Собринин А.А. Исследование напряжений в изложницах методом магнитной памяти металла // *Литейщик России*. – 2011. – №10. – С. 21-24.

Сведения об авторе

Бройтман Олег Аркадьевич – канд. техн. наук, ООО «Сименс», С.-Петербург.
Тел.: (812) 324-83-59. E-mail: oleg.broytman@siemens.com

Рисунки к статье О.А. Бройтмана **Изготовление крупных кузнечных слитков без осевых усадочных дефектов в измененной изложнице**

Рис. 1. Конечно-элементные модели, воспроизводящие технологию литья 80-т слитка: **а** – традиционная, **б** – с использованием изложницы измененной конструкции

Рис. 2. Результаты моделирования формирования слитка в изложнице традиционной конструкции: **а** – усадка (показаны зоны, в которых пористость – 0,5%), **б** – динамика изменения доли жидкой фазы

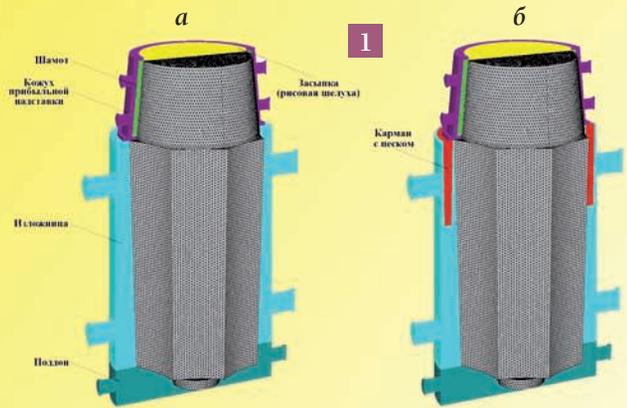
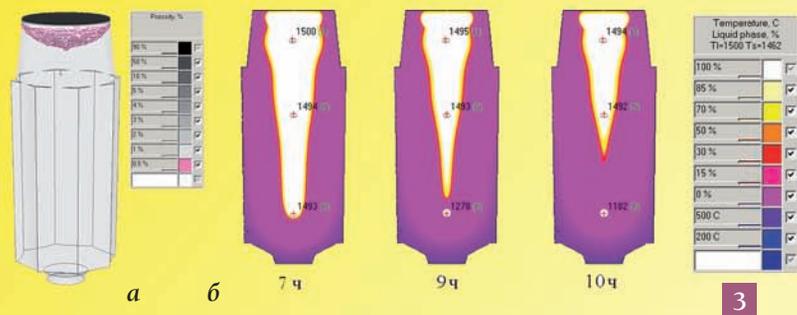
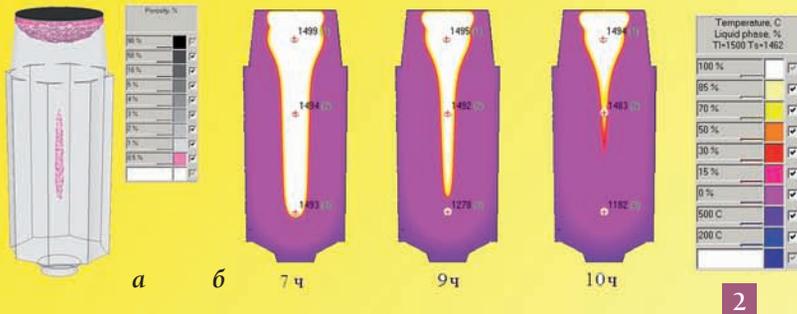
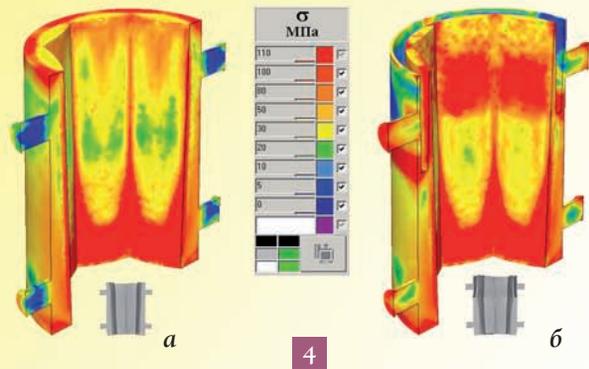


Рис. 3. Результаты моделирования формирования слитка в изложнице измененной конструкции: **а** – усадка (показаны зоны, в которых пористость – 0,5%), **б** – динамика изменения доли жидкой фазы

Рис. 4. Остаточные напряжения в изложнице традиционной (**а**) и измененной (**б**) конструкций



Рисунки к статье **Веселовского А.А.**

Шероховатость контактной поверхности зубчатых колес с антифрикционным покрытием



Рис. 1. Зубчатая пара заднего хода легкового автомобиля ВАЗ 2107 с Cu-покрытием (поверх диффузионного)

Рис. 2. Диаграмма изменения шероховатости поверхности шестерни (**а**) и сопряженного с шестерней ЗК (**б**) с антифрикционным покрытием: ряд 1 – исходная шероховатость (после ванадирования), 2 – после покрытия антифрикционным материалом, 3 – после приработки в паре; А – Al, Б – ОЦС 555, В – Cu

