

УДК 629.463:621.74.041:621.78.084

DOI: 10.30987/article\_5b0e4111d99220.56483869

**Р.А. Савушкин**, генеральный директор, к.т.н.,  
(ПАО «Научно-производственная корпорация «Объединенная Вагонная Компания»,  
115184, г. Москва, ул. Новокузнецкая, д. 7/11, стр. 1),  
**К.В. Кякк**, к.т.н., **О.А. Бройтман**, к.т.н., **А.С. Кононенко**, главный конструктор,  
**М.И. Терентьев**, ведущий инженер, **С.А. Бородин**, ведущий инженер  
(ООО «Всесоюзный научно-исследовательский центр транспортных технологий»,  
199106, Санкт-Петербург, 23-я линия ВО, 2А)  
E-mail: akononenko@tt-center.ru

## **Научоёмкие технологии производства литых упоров объединённых в составе хребтовой балки грузовых вагонов с осевой нагрузкой 27 тс**

*Для решения задачи выпуска железнодорожных вагонов повышенной грузоподъёмности и надёжности предложено использовать в их конструкции хребтовую балку с новым видом консольной части, построенной на базе литой детали упоров передних и задних объединённых. Специальные требования к характеристикам литой детали определили необходимость разработки технологий её изготовления с помощью научноёмких экспериментов и современных способов компьютерного анализа.*

*Работа посвящена описанию методов и технологических разработок, позволивших обеспечить производство сложной и ответственной литой детали. Проектирование технологии литья выполняли при использовании компьютерного моделирования. Для обеспечения высокой износостойкости пятника на базе компьютерных расчётов и натурных экспериментов была разработана технология закалки токами высокой частоты.*

**Ключевые слова:** вагон повышенной грузоподъёмности; хребтовая балка; упоры передние и задние объединённые литые; поверхностная закалка; компьютерное моделирование.

**R.A. Savushkin**, Director-general, Can. Eng.,  
(Research and Production Corporation "United Wagon Company", PJSC,  
Building 1, 7/11, Novokuznetskaya Str., Moscow 115184)  
**K.V. Kyakk**, Can. Eng., **O.A. Broymtan**, Can. Eng., **A.S. Kononenko**, Chief designer,  
**M.I. Terentyev**, Principal engineer, **S.A. Borodin**, Principal engineer  
(“All-Union Research and Development Centre for Transportation Technology”, LLC,  
2a, 23-d Line VO, Saint-Petersburg, 199106)

## **Science intensive production technologies of cast draft-sill for center sill of freight car with the 27 t axial load**

*To solve the problem of manufacturing freight cars with increased carrying capacity and reliability it is offered to use in their design a center sill with a new type of a cantilever part created on the basis of a cast draft-sill. Special requirements to the characteristics of a cast part defined a necessity to develop technologies for its manufacturing with the aid of science intensive experiments and current methods of the computer analysis. The work is devoted to the description of methods and technological developments allowing the manufacturing a complex and critical part. The design of casting technology was carried out with the use of computer simulation. To ensure high wear-resistance of a draft-sill center plate surface there was developed a technology of induction hardening on the basis of computations and full-scale experiments.*

**Keywords:** freight car with increased carrying capacity; center sill; draft-sill; surface quenching; computer modeling.

**Введение**

Совершенствование конструкций и технологий производства продукции вагоностроения позволяет задавать новый уровень требований к характеристикам её надёжности, грузоподъёмности, что положительно сказывается на экономике железнодорожных перевозок. Указанные направления развития отрасли однозначно согласуются с задачей внедрения тяжеловесного грузового движения, входящей в стратегию развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации.

Повышение грузоподъёмности может быть достигнуто за счет увеличения осевой нагрузки, снижения массы тары (её металлоемкости) при повышении объема кузова, а применение усовершенствованных технологий производства деталей в составе вагонов новых конструкций позволяет увеличить межремонтные интервалы и срок службы последних. При этом использование того же числа подвижного состава позволит перевезти больше груза в единицу времени, а также уменьшить стоимость жизненного цикла вагона, в том числе экономические потери от простоя на плановых и внеплановых видах ремонта. Учитывая, что до 80 % всего грузооборота России приходится на железнодорожный транспорт, актуальность разработки и внедрения соответствующих конструктивных решений в области вагоностроения представляется несомненной.

**Хребтовая балка грузового вагона новой конструкции**

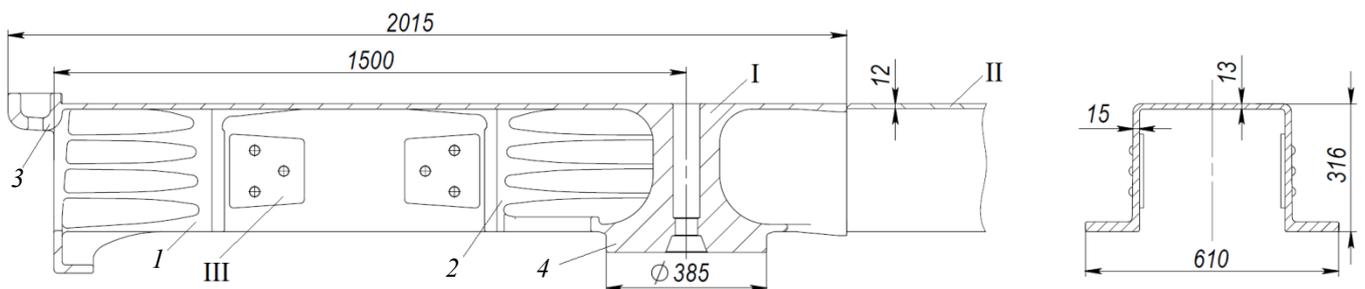
При изготовлении грузовых вагонов традиционно используется хребтовая балка, представляющая собой сварную конструкцию из специальных профилей или листов, воспринимающая весь спектр продольных и вертикальных нагрузок, возникающих при эксплуатации вагона. В консольных частях балки устанавливаются передние и задние упоры авто-

сцепного устройства для передачи продольных нагрузок, пятники и надпятники для передачи вертикальных нагрузок. При этом упоры крепятся с помощью заклепочных соединений либо сварки, пятники – с помощью заклепочных или болтовых соединений, надпятники – с помощью сварки. Таким образом, процесс изготовления хребтовой балки является достаточно трудоемким и длительным, связанным с применением нескольких позиций сборки-сварки и задействованием большого числа персонала и технологического оборудования.

Значительное число сборочных операций является обстоятельством, требующим оптимизации с целью повышения производительности при изготовлении рассматриваемого узла, а также представляет собой фактор риска с точки зрения обеспечения надёжности всех составляющих элементов в процессе длительной эксплуатации вагона. Решением упомянутых проблем является внедрение хребтовой балки новой конструкции, отличающейся особым видом консольной части.

При проектировании учитывали опыт североамериканского вагоностроения, однако принципиальные отличия конструкций вагонов и условий эксплуатации не позволяют ограничиться лишь адаптацией – потребовалась полноценная переработка узла, исходя из известной базовой концепции его постройки.

Разработанная в результате конструкция предполагает использование литой детали, объединяющей в себе задние и передние упоры с ударной розеткой, пятник, надпятник и часть хребтовой балки (рис. 1). Такие детали, получившие наименование объединённых упоров передних и задних, привариваются с двух сторон к центральной части – гнтому омега-профилю, после чего получившаяся хребтовая балка способна выполнять те же функции в составе вагона, что и ранее известный аналог, обладая при этом улучшенными характеристиками.



**Рис. 1. Консольная часть хребтовой балки, собранная с использованием единой литой детали:**  
 I – литые упоры передние и задние объединённые; II – омега-профиль; III – планка против истирания; 1 – упор передний; 2 – упор задний; 3 – розетка ударная; 4 – надпятник с пятником

Сборка изменённой хребтовой балки отличается снижением себестоимости, поскольку сводится лишь к наложению сварочных швов умеренной протяжённости, при соединении полученных литым и пластической деформацией элементов, а трудоёмкие операции сверления большого числа отверстий, установки заклепок горячим способом, выполнения болтовых соединений или дополнительных сварочных работ при этом оказываются полностью исключены. Однако главными преимуществами новой конструкции является возможность развивать на её базе решения целевых задач повышения грузоподъёмности и надёжности, исходя из следующих соображений:

- применение пятника уменьшенной высоты позволяет понизить центр тяжести вагона, что положительно сказывается на его ходовых качествах и открывает возможность увеличения объема кузова более чем на 2 м<sup>3</sup>;

- достигаемое снижение массы хребтовой балки на 200...250 кг означает снижение общей массы тары вагона с возможностью соответствующего повышения грузоподъёмности;

- снижение числа сборочных единиц в составе конструкции повышает её надёжность и снижает чувствительность к возможным отклонениям в поведении каждой из них в процессе эксплуатации, одновременно упрощая задачу контроля состояния узла.

При проектировании новой конфигурации узла использовали компьютерное моделирование для анализа напряжённо-деформированного состояния в составе вагона с использованием приложения NX Advanced Simulation. В результате проектирования были определены конструктивные особенности литой детали, требования к механическим свойствам её материала и характеристикам качества, создан соответствующий комплект конструкторской документации.

Неоспоримые преимущества использования в конструкции вагона единой литой детали в качестве консольной части хребтовой балки сочетаются с комплексом подлежащих предварительному решению сложных задач в части эксплуатации и технологий производства, среди которых:

- литая деталь становится несменяемым элементом хребтовой балки, поэтому должна иметь срок службы, совпадающий со сроком службы всего вагона;

- для гарантии удовлетворительного качества отливки и сварного шва в месте присоединения к омега-профилю требуется осуществление сравнительно высокого объёма нераз-

рушающего контроля;

- технология производства отливки должна обеспечивать устойчиво высокую сплошность металла, низкую склонность к возникновению дефектов, а все параметры разработанного технологического процесса требуют строгого контроля в условиях массового производства.

Материалами, отвечающими сформированным требованиям к характеристикам механических свойств, являются традиционно используемые при производстве отливок железнодорожного назначения стали марок 20ГЛ, 20Г1ФЛ, 20ГСЛ по ГОСТ 977-88 в нормализованном или нормализованном и отпущенном состоянии.

Анализ напряжённо-деформированного состояния литой детали и условий её эксплуатации в составе вагона позволил также назначить зоны неразрушающего контроля в высоконагруженных ответственных участках литой детали и установить особые требования к характеристикам износостойкости пятника для обеспечения потребного срока службы в 40 лет.

Проведённое расчётно-аналитическое исследование с учётом практического опыта эксплуатации подобных элементов позволило установить необходимый уровень твёрдости на поверхности пятника и потребную глубину износостойкого слоя. Твёрдость опорной (горизонтальной) и упорной (боковой) поверхностей пятника должна быть 395...542 HV (375...515 HB), на глубине 3,2 мм – не менее 368 HV (350 HB), а на глубине 9,6 мм – не превышать 315 HV (300 HB). Твёрдость отливок из упомянутых сталей в нормализованном состоянии составляет 135...190 HB, поэтому очевидна необходимость прибегнуть к специальным технологиям получения слоя повышенной твёрдости на поверхности металлической заготовки.

#### **Разработка технологии производства отливки упоров передних и задних объединённых**

При разработке конструкции литой детали, прочность которой на этапе проектирования подтверждается соответствующими численными расчётами, должно учитывать соображения технологичности. Кроме принятия во внимание общих принципов конструирования получаемых литым деталями в современных условиях целесообразно использовать системы компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП), сочетая разработку тех-

нологии производства отливки с доводкой её конструкции.

Подготовка литейной технологии и процесса производства отливок в условиях компаний, выполнявших проектирование и производство упоров передних и задних объединённых, сопровождается применением технологий CAD/CAE/CAM с доминированием

принципа сквозного проектирования. Созданные на предыдущем этапе разработки 3D-модели наследуются для использования (преобразования) на следующих, вплоть до физического воплощения в литейной модельно-стержневой оснастке (МСО) и отливках. Схема на рис. 2 иллюстрирует практикуемую идеологию – элемент цифрового производства.



Рис. 2. Место сквозного проектирования в цепочке подготовки и запуска производства отливок

В качестве способа литья для производства отливки упоров передних и задних объединённых использовали заливку в изготовленные методом вакуумно-плёночной формовки (ВПФ) формы с песчано-смоляными стержнями.

В табл. 1 дана обобщенная характеристика преимуществ работы с ВПФ при производстве стальных отливок (по материалам [1, 2] и данным авторов) в сравнении с традиционно применяемыми способами изготовления разовых песчаных форм на разных связках.

Настоящую литую заготовку коробчатого типа отличает преобладающе малая толщина стенки, в среднем около 15 мм, при существенной общей протяжённости изделия, присутствуют участки с существенной разнотолщинностью, поэтому ценной представляется возможность достижения повышенной жидкотекучести и управления податливостью песчаной формы путём регулирования разрежения в межзёрненном пространстве.

Для реализации управления податливостью формы на практике предпринимали отключение опок от вакуумной системы по истечении около 5 мин после заливки расплава, что спо-

собствует снижению напряжений в отливке при взаимодействии с формой. Время отключения вакуума индивидуально для отливок с разной толщиной стенки и должно определяться с учётом моделирования затвердевания и посредством ряда натурных экспериментов. Преждевременное снятие вакуума до момента образования на поверхности отливки прочной твёрдой корки достаточной толщины способно обернуться нарушением размерной точности.

В связи с особыми требованиями к отливке актуальной оказывается возможность получения в вакуумно-плёночной форме литых заготовок с повышенной точностью, качеством поверхности и др. В силу того, что задача получения стержней решается путём их изготовления по одному из наиболее совершенных способов формообразования при работе со связанными смесями (cold-box процессу с продувкой газообразным триэтиламинным катализатором) с последующей окраской окуриванием, упомянутые характеристики качества отливки упоров передних и задних объединённых удаётся сохранять на высоком уровне.

**1. Обобщенная характеристика основных преимуществ работы с ВПФ в сравнении с использованием содержащих связку песчаных смесей**

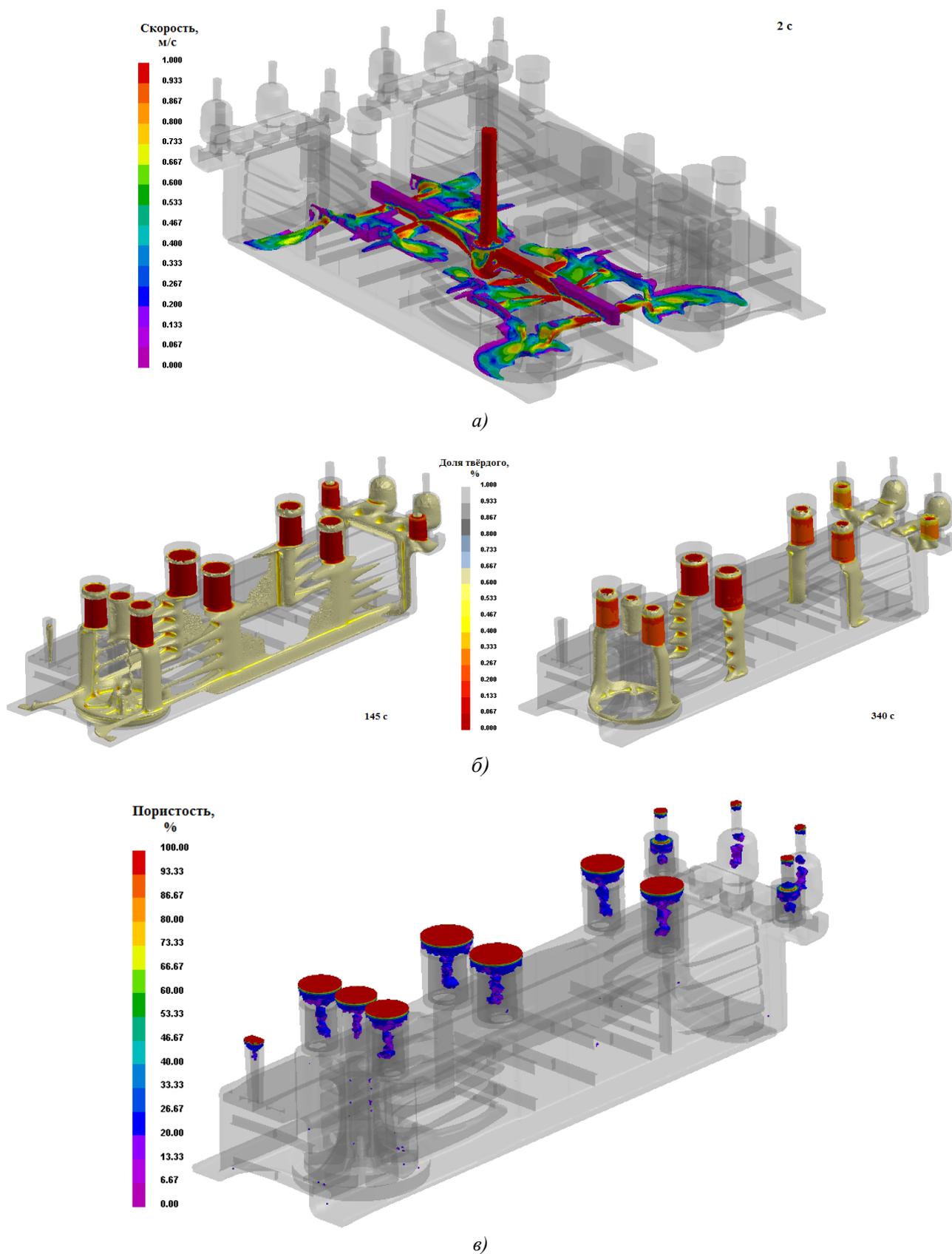
Характеристика качества или технологический параметр	ВПФ	Песчаная форма со связующим
Размерная точность, класс по ГОСТ Р 53464-2009	7–12	8–14
Минимальные литейные и формовочные уклоны	-0,5°...0°	1°
Усилие при протяжке	На 20% – 70% ниже	Уступает ВПФ
Качество поверхности отливки, Rz	20...40	40...80
Жидкотекучесть расплава (возможность получения тонких стенок)	Выше на ~20%	Уступает ВПФ
Прямое управление прочностью формы в процессе остывания отливки	Да, регулирование разрежения	Осложнено, требует применения разупрочняющих добавок
Необходимость применения разделительных составов	Нет	Да
Живучесть смеси	Неограниченная	Для большинства смесей – ограниченное время
Текучесть смеси	Высокая	Уступает ВПФ
Выбиваемость	Максимальная	Уступает ВПФ
Газотворность	Определяется лишь чистотой песка и эффектом от сгорания плёнки	Выше: выгорание смол, испарение влаги и др.
Повреждаемость опок	Сниженная	Уступает ВПФ
Износ модельной оснастки	Минимален: нет прямого взаимодействия с абразивом	Выше: присутствует прямой контакт с абразивом

Совмещение в составе одной отливки нескольких, также производимых литьём, элементов при всех достоинствах конструкции финального узла задаёт её повышенную сложность. Кроме необходимости удовлетворения повышенным требованиям к качеству отливки, выступающей в качестве базовой заготовки для создания единого несменного элемента в составе вагона, требуется найти такое её положение в форме, чтобы обеспечить рациональные условия питания всех её частей. При этом наличие конструктивно обусловленной увязки взаиморасположения ранее отдельных элементов в составе единого ограничивает число степеней свободы при выборе наилучших условий получения отливки. Это обстоятельство требует целенаправленного внедрения уточнений в конструкцию детали, благоприятствующих возможности получения литой заготовки удовлетворительного качества.

На этапе совершенствования конструкции детали и разработки литейной технологии выполняли численное моделирование в СКМ ЛП ProCAST (рис. 3). На рис. 3, а представлен фрагмент результатов моделирования заливки, путём анализа которых удаётся виртуально опробовать и скорректировать конструкцию литниковой системы, отследить области раз-

режения потока металла, нежелательные с точки зрения противодействия газовым дефектам; участки, для которых характерно интенсивное термомеханическое воздействие на форму и стержни, что грозит появлением зазоров, формирование локальных перегретых областей, способных отрицательно повлиять на склонность к усадке, и др.

Моделирование затвердевания позволяет протестировать разработанную систему питания отливки, определить наличие изолированных тепловых узлов, служащих причиной образования усадочных дефектов. Результаты тепловых расчётов для отливки оптимизированной конструкции (рис. 3, б), позволяют сделать вывод о надёжной работе системы питания, выполненной на базе, преимущественно, заключённых в экзотермические оболочки прибылей, с преобладанием соблюдения принципа направленного затвердевания, что минимизирует склонность к образованию усадки в объёме отливки (рис. 3, в). Получению такого результата предшествовали многочисленные расчёты по мере доводки разных элементов в составе единой отливки с созданием необходимых напусков, уточнением размеров, выбором оптимальных габаритов и мест установки прибылей.



**Рис. 3. Результаты моделирования формирования отливки:**

- а* – распределение скоростей в каналах литниковой системы и полости формы в начале (на 2 с) заливки расплава;
- б* – динамика затвердевания: в разные моменты времени от завершения заливки (145/340 с) визуализированы участки, в которых концентрация жидкой фазы ниже 65 %;
- в* – прогноз областей формирования усадочных дефектов

Детерминированные модели в составе СКМ ЛП было бы некорректно считать средством, позволяющим однозначно предсказать размерную точность фасонной отливки. Погрешности, связанные с неточностями при изготовлении оснастки, её износом, особенностями сборки форм и др., способны повлиять на точность в куда большей степени, чем может следовать из одного лишь анализа термомеханического взаимодействия отливки и формы. Тем не менее, использование средств расчетного анализа при решении задач о размерной точности отливок следует считать целесообразным для выявления нетривиальных случаев развития литейной усадки, обусловленных исключительно физикой процесса, влиянием регистрируемых погрешностей исходных условий процесса литья (температура заливки, формы, изменение материалов формы и т.п.),

что в дальнейшем может быть учтено при проектировании и доводке МСО.

Для компенсации коробления в склонной к этому отливке требовалось оснастить её технологическими стяжками. Их местоположение и толщина подбирались при помощи моделирования напряжённо-деформированного состояния в процессе затвердевания и остывания отливки, чтобы надёжно препятствовать нарушению геометрии с выходом за пределы допуска, а также исключить образование усадочных дефектов по вине возникновения тепловых узлов в месте примыкания стяжек к стенкам.

На рис. 4 показана принятая схема расположения стяжек и результаты расчёта, подтверждающие рациональность их положения для обеспечения удовлетворительной точности.

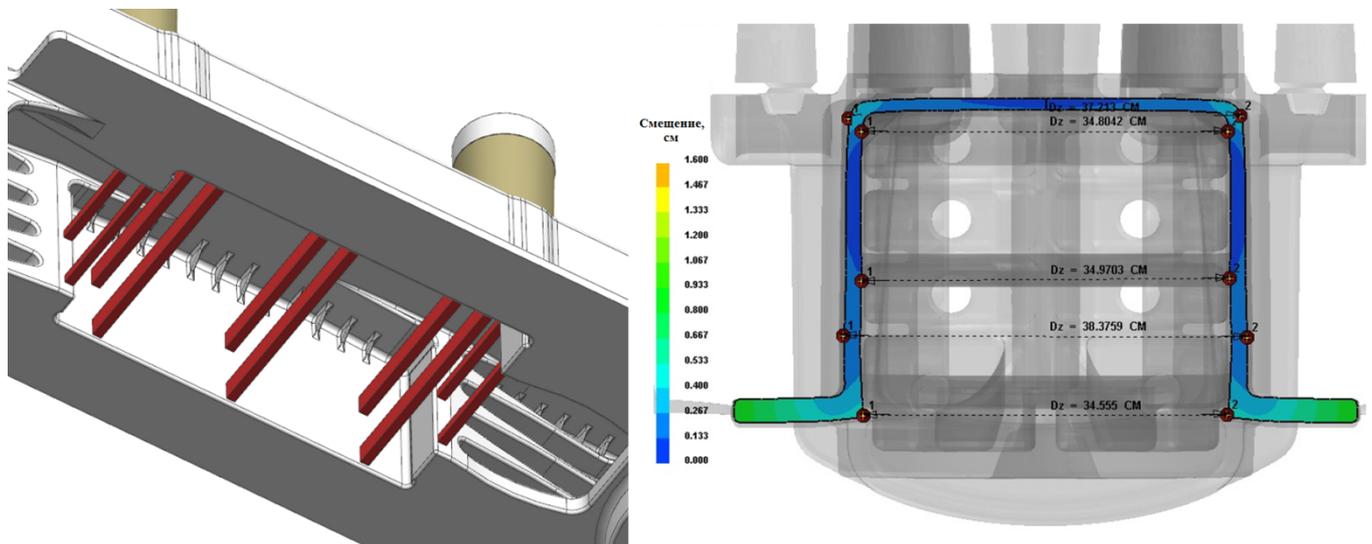


Рис. 4. Принятое расположение стяжек и результаты расчёта поля смещений после остывания отливки

Анализ напряжённо-деформированного состояния позволил также установить места возникновения повышенных напряжений при затвердевании в момент существования твёрдо-жидких областей, оснастить выявленные склонные к образованию горячих трещин участки технологическими рёбрами необходимого размера и ввести соответствующие компенсирующие изменения в конструкцию.

#### Разработка технологии поверхностной закалки пятника

Для повышения устойчивости опорной и упорной поверхностей пятника к истиранию решено обеспечить на них присутствие твёрдого износостойкого слоя. Первоначально

рассматривали вопрос о том, какой из известных технологий следует отдать предпочтение для достижения выдвинутых требований к твёрдости, принимая во внимание соображения экономичности и производительности.

Технологии создания твёрдого слоя могут быть подразделены на химико-термические (цементация, азотирование, нитроцементация), термические (закалка лазером, закалка токами высокой частоты, пламенная закалка), термические с расплавлением (плазменное напыление, индукционная наплавка, наварка) и механические (накатка, дробеструйный наклеп).

Химико-термические способы дают хорошо повторяемые результаты, однако являются малопродуктивными – в частности, для

обеспечения слоя глубиной 3,2 мм с применением газовой цементации при 925 °С согласно расчётной оценке по известным методикам [3] понадобится порядка 23 ч.

Использование технологий напыления для создания столь толстого слоя также отличает низкая производительность, а кроме того потребность в закупке специальных материалов (проволоки или порошковых), соблюдении условий их хранения и подготовки для исключения окисления, увлажнения и др. Применение технологии лазерной закалки, эффективность которой в приложении к пятнику была опробована в настоящей работе в рамках соответствующего экспериментального апробирования, целесообразно для надёжного получения закаленных слоёв глубиной до 1 мм [4]. Пламенную закалку отличает нестабильность результата. Механические способы упрочнения не позволяют выполнить слой требуемой толщины.

Наиболее целесообразным с точки зрения экономичности и производительности при обработке пятника признали внедрение технологии поверхностной закалки токами высокой частоты (ТВЧ). В числе основных преимуществ способа – стабильность результата обработки, широкие возможности по автоматизации процесса, малая продолжительность операции закалки, а также отсутствие необходимости использования дополнительных сырьевых материалов.

Предварительному анализу подлежал вопрос о достижимости требуемых значений твёрдости при поверхностной закалке низкоуглеродистой стали марки 20ГЛ, принятой в качестве базовой при производстве отливок упоров передних и задних объединённых. Согласно классическим представлениям закалке ТВЧ рационально подвергать обладающие хорошей закаливаемостью средне- и высокоуглеродистые стали [5]. Однако при простом анализе закаливаемости сталей [6] может быть показано (рис. 5), что для содержания углерода 0,15...0,25 % требуемые значения твердости достижимы посредством выполнения закалки: так, твердость 395...542 HV может наблюдаться при получении структуры с 80...99 %

мартенсита, а значения твердости не менее 368 HV – при структуре с не менее 50 % мартенсита.

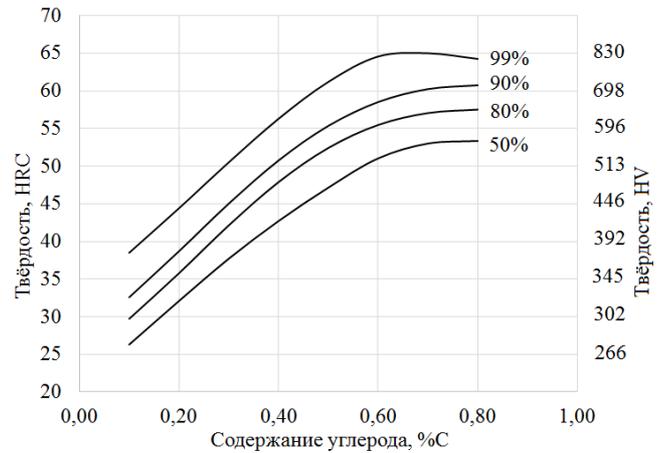


Рис. 5. Твёрдость углеродистых и низколегированных сталей после закалки в зависимости от содержания углерода и объёмной доли мартенсита в структуре

Для оценки температур образования аустенита (точки  $A_{C3}$ ) при ТВЧ нагреве, а также установления скоростей охлаждения, необходимых для формирования мартенситных и смешанных мартенсито-бейнитных структур, обеспечивающих требуемые значения твердости, необходимы данные о кинетике образования и распада аустенита в стали марки 20ГЛ.

С целью получения этой информации выполняли соответствующие расчеты в программном пакете JMatPro. Полученные по результатам расчётов режимы нагрева и охлаждения далее подлежали реализации в рамках соответствующей экспериментальной работы.

Имитирующие пятник литой детали образцы для проведения экспериментальной работы по поиску пригодного режима закалки ТВЧ изготавливали из отдельно отлитых круглых слитков. Химический состав стали в образцах (типовой для условий литейного производства, на котором планировалось освоение отливки упоров передних и задних объединённых), с учётом которого проводили расчёты кинетики структурообразования, приведён в табл. 2.

## 2. Химический состав стали марки 20ГЛ (по результатам анализа ковшевой пробы)

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	V
0,19	0,42	1,25	0,008	0,019	0,18	0,08	0,08	0,059	0,009

При высоких скоростях нагрева, реализуемых при обработке ТВЧ, формирование ау-

стенита из исходной феррито-перлитной структуры происходит при больших темпера-

турах, чем при печном нагреве. Результаты расчетов зависимости температур полного превращения исходной феррито-перлитной структуры в аустенит от скорости нагрева представлены на рис. 6.

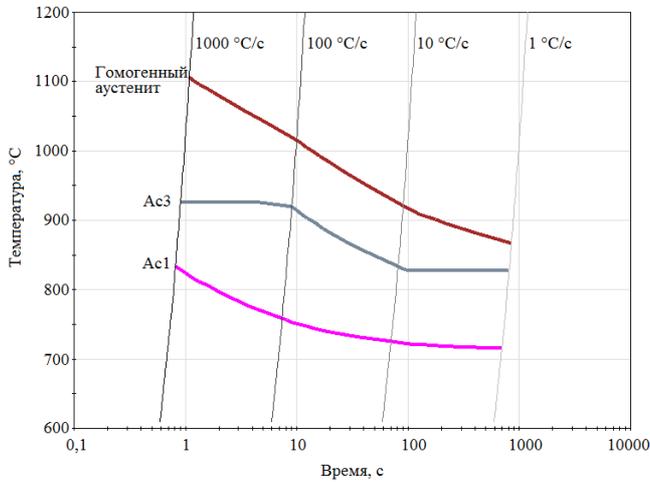


Рис. 6. Зависимость температур полного превращения исходной феррито-перлитной структуры в аустенит от скорости нагрева

Скорость нагрева ТВЧ находится в диапазоне 100...1000 °C/c [5]. Как видно из диаграммы, в диапазоне 100...1000 °C/c влияние скорости нагрева умеренное и температура  $A_{C3}$  (пунктирная линия) изменяется в пределах 914...925 °C. Таким образом, одним из условий удовлетворительного исхода закалки является обеспечение при нагреве указанного минимально необходимого для протекания аустенизации уровня температур на глубине 3,2 мм от поверхности.

Принятое значение температуры  $A_{C3}$  (925 °C), размер зерна (№9 по ГОСТ 5639-82), а также химический состав (см. табл. 2) использовали в качестве входных параметров для расчета базовой термокинетической диаграммы распада аустенита стали марки 20ГЛ при непрерывном охлаждении (рис. 7). Исходя из диаграммы, для обеспечения требуемых значений твердости необходимо достижение скоростей охлаждения по меньшей мере в 80 °C/c на поверхности (407 HV) и 60 °C/c – на глубине 3,2 мм (374 HV).

Результаты расчетов условий формирования необходимых характеристик твердости стали позволили поставить задачу последующего численного исследования процесса закалки ТВЧ, конечной целью которого явилось установление параметров режима нагрева, обеспечивающих достижение требуемых температур аустенизации по всей ширине подде-

жащего закалке слоя, и условий теплоотвода для реализации требуемых скоростей охлаждения.

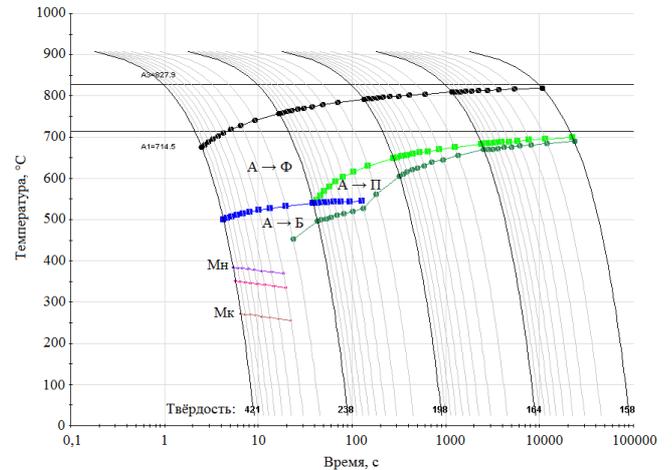


Рис. 7. Расчётная термокинетическая диаграмма распада аустенита для стали марки 20ГЛ исследуемого состава

Физические свойства стали марки 20ГЛ в области твердофазных превращений (температурозависимые магнитная проницаемость, плотность, удельная теплоёмкость, теплопроводность), служащие информационным обеспечением расчётов при моделировании нагрева ТВЧ и охлаждения, были вычислены в программном комплексе JMatPro.

Численные расчёты подтвердили предварительные экспертные оценки относительно потребного метода закалки ТВЧ. Достичь необходимых значений твердости можно лишь при максимизации скорости обработки ТВЧ с моментальным интенсивным орошением водой, что может быть обеспечено при использовании технологии непрерывно-последовательной закалки.

При помощи моделирования была разработана оптимальная конструкция установки, определены базовые параметры согласующего устройства (характеристики трансформатора и ёмкость компенсирующего конденсатора), необходимые для передачи требуемой мощности от источника питания к индуктору.

По завершении расчётов была построена экспериментальная установка, работающая по принципу непрерывно-последовательной закалки, с помощью которой проводили апробирование найденных режимов на опытных образцах, а затем, после тонкой доводки параметров работы, позволившей, в частности, стабилизировать результат вне зависимости от разброса химического состава в пределах ма-

рочно, производили обработку содержащих пятник фрагментов литой детали и, наконец, полноразмерных изделий из числа опытной партии. Анализ результатов закалки на предмет соответствия предъявляемым требованиям производили путём разрушающего контроля.

Рабочим органом установки является медный индуктор с ферритовым магнитопроводом. Линейные размеры индуктора выбраны таким образом, чтобы полностью покрывать подлежащие обработке опорную и упорную поверхности пятника, будучи отстоящим от них с зазором 1...3 мм. Выполнение закалки на предварительно подвергнутой механической обработке (позволяющей, как достичь

требуемую размерную точность, так и устранить обезуглероженный слой после выполнения нормализации отливки) поверхности способствует хорошему соблюдению требований к зазору и не требует устройства сложной системы позиционирования индуктора.

В процессе вращения индуктора вокруг оси пятника над обрабатываемыми поверхностями (рис. 8) разогревается находящийся в непосредственной близости узкий сегмент металла, и сразу после этого следует его интенсивное спрейерное охлаждение из находящихся на индукторе отверстий. Процесс получения закалённого слоя одной детали занимает около 5 мин. Далее проводится низкий отпуск в печи для снятия остаточных напряжений.

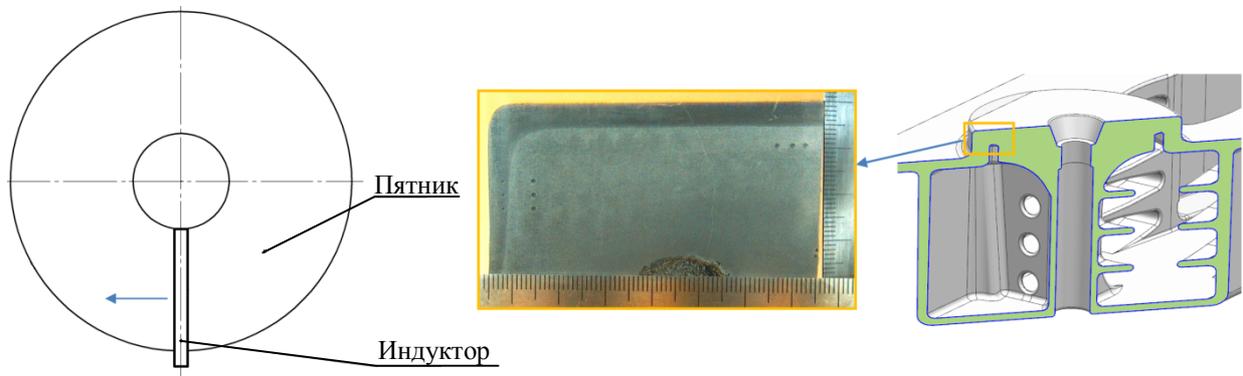


Рис. 8. Схема вращения индуктора-спрейера вокруг оси пятника при закалке и демонстрация результата обработки опорной и упорной поверхностей на травлёных макрошлифах

Типичные результаты контроля структуры закалённого слоя на пятнике в образце из состава опытной партии показаны на рис. 9. В табл. 3 сведены данные по наблюдаемым в результате контроля разных образцов значениям твёрдости по глубине закаленного слоя.

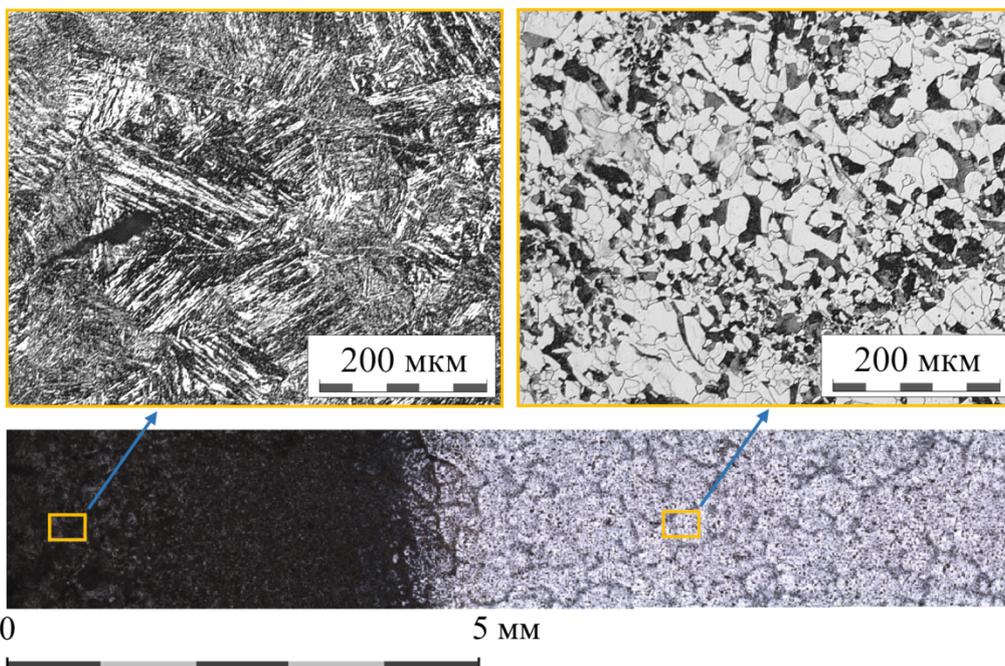


Рис. 9. Микроструктура закаленного слоя и прилегающих областей под опорной поверхностью пятника

**3. Распределение твёрдости в пятнике по результатам закалки ТВЧ**

Глубина, мм	Твёрдость, HV <sub>10</sub>	
	Требуемый уровень	Опорная и упорная поверхности
0,0	395...542	450 ± 50
3,2	≥368	410 ± 35
9,6	≤315	180 ± 20

Видимая глубина закалённого слоя с более высокой, в сравнении с основным металлом, травимостью составляет около 4 мм. Вплоть до глубины около 3 мм наблюдается обеспечивающая высокую твёрдость мартенситная или мартенситно-бейнитная микроструктура. Приведённые результаты контроля свидетельствуют об успешной разработке технологии поверхностной закалки для достижения требуемых характеристик износостойкого слоя.

**Заключение**

Результатом разработки конструкции и технологий производства детали упоров передних и задних объединённых явилась возможность обеспечения выпуска на Тихвинском вагоностроительном заводе полувагонов с осевой нагрузкой 27 тс, содержащих хребтовую балку с консольными частями новой конструкции (рис. 10).

В начале 2018 г. на полувагон и литую деталь получены сертификат и декларация о соответствии, что позволило приступить к серийному выпуску продукции. Изготовление литых упоров передних и задних объединённых согласно разработанной технологии производится при использовании автоматической линии ВПФ для выпуска крупного вагонного литья (совместно с рамами боковыми и балками наддрессорными) производительностью 20 форм/ч.

Закалка пятников в соответствии с принятым технологическим процессом организована при помощи специализированной промышленной установки, обеспечивающей выполнение цикла установки/закалки/снятия готового изделия за время около 10 мин. Сборка литой детали с омега-профилем при производстве хребтовой балки осуществляется с применением полуавтоматической сварки в среде защитных газов. По мере роста объёмов выпуска планируется внедрение роботизированного сварочного комплекса.

Применение разработанных конструктивных решений и технологий на практике позволило вывести характеристики выпускаемой

продукции на новый качественный уровень, выражающийся в повышении эффективности вагоностроительного производства и объёма грузоперевозок.



**Рис. 10. Литые упоры передние и задние объединённые и собранный с применением новой детали в составе хребтовой балки полувагон модели 12-9548-02**

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. **Иванов, В.В.** Теория и практика изготовления отливок в вакуумно-плёночных формах. – Владивосток: Дальнаука, 2006. – 252 с.
2. **Минаев, А.А., Ноткин, Е.Б., Сазонов, В.А.** Вакуумная формовка. – М.: Машиностроение, 1984. – 216 с.
3. **ASM Handbook Volume 4A: Steel Heat Treating Fundamentals and Processes;** edited by Dossett J. L., Totten G.E. ASM International, 2013. – 784 p.
4. **Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / под ред. В.Я. Панченко.** – М.: Физматлит, 2009. – 664 с.
5. **Головин, Г.Ф., Замятин, М.М.** Высокочастотная термическая обработка: вопросы металловедения и технологии. – Л.: Машиностроение, 1990. – 239 с.
6. **Йех Я.** Термическая обработка стали. – М.: Металлургия, 1979. – 264 с.

**REFERENCES**

1. **Ivanov, V.V.** *Theory and Practice of Manufacturing Castings in Vacuum-Film Moulds.* – Vladivostok: Dalnauka, 2006. – pp. 252.
2. **Minaev, A.A., Notkin, E.B., Sazonov, V.A.** *Vacuum Molding.* – M.: Mechanical Engineering, 1984. – pp. 216.
3. **ASM Handbook Volume 4A: Steel Heat Treating Fundamentals and Processes;** edited by Dossett J. L., Totten G.E. ASM International, 2013. – 784 p.
4. **Laser Technologies in Material Processing: Current Problems of Fundamental Investigations and Applied Developments / under the editorship of V.Ya. Panchenko.** – M.: Physmathlit, 2009. – pp. 664.
5. **Golovin, G.F., Zamyatin, M.M.** *High-frequency Thermal Treatment: Problems of Metal Science and Technology.* – L.: Mechanical Engineering, 1990. – pp. 239.
6. **Yekh, Ya.** *Steel Thermal Treatment.* – M.: Metallurgy, 1979. – pp. 264.

*Рецензент д.т.н. Ю.П. Бороненко*