



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-1-65-73>
УДК 621.746.019

Поступила 10.01.2020
Received 10.01.2020

ВЛИЯНИЕ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ НА СТРУКТУРНОЕ КАЧЕСТВО ЗАГОТОВОК ИЗ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОЙ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ 20X2H4A, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА

*П. И. ПАПКОВСКИЙ, А. Л. ВАЛЬКО, С. Г. САНДОМИРСКИЙ, Объединенный институт
машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. Академическая, 12. E-mail: sand_work@mail.ru*

Проблема образования трещин и условия их зарождения в литой металлопродукции изучена в мировой практике, но механизм этого процесса еще не выяснен настолько, чтобы его можно было применить в производстве. Горячие трещины – один из самых распространенных и наиболее убыточных пороков стальных отливок, приводящих к значительному удорожанию стоимости изделий. Образование горячих трещин в стальных отливках зависит от многих факторов, к числу которых относятся химический состав стали, наличие в нем неметаллических включений и газов, условия раскисления и затвердевания стали и др. Поэтому особое внимание в реальных условиях производства необходимо уделять металлургической стороне вопроса. В литературе по металлургии нет количественного показателя чистоты стали, которая подразделяется на химическую, определяемую химическим анализом, и металлографическую, определяемую по содержанию неметаллических включений. Если влияние общей чистоты стали на характеристики разрушения изучено достаточно подробно, то данные об индивидуальном влиянии примесей весьма неполные.

По многим показателям чистая сталь имеет явные преимущества по сравнению с содержащей вредные примеси. Это относится ко всем механическим свойствам, связанным с разрушением, или к процессам, происходящим на границе зерен. Кардинальным способом получения более чистой стали, в том числе и по примесям цветных металлов, является применение чистой первородной шихты.

В статье рассмотрены вопросы актуальной проблемы образования трещин после химико-термической обработки в материале солнечных шестерен второго ряда карьерных самосвалов БЕЛАЗ, полученных методом центробежного электрошлакового переплава (ЦЭШП) проката стали 20X2H4A, возможного влияния малых концентраций цветных металлов (Pb, Zn, Sn, Sb, Bi, As, Se) на развитие наружных и внутренних трещин в отливках и на структурную неоднородность стали после ЦЭШП.

Рассмотренные результаты позволили сделать выводы о влиянии цветных металлов на образование трещин в отливках и установить их предельные количественные характеристики. На основе полученных результатов предложены мероприятия по минимизации воздействия малых количеств цветных металлов на образование трещин в отливках.

Ключевые слова. Низколегированная сталь, металлургические процессы, химический состав, примеси цветных металлов, трещины, микроструктура.

Для цитирования. Папковский, П. И. Влияние цветных металлов на структурное качество заготовок из высоколегированной низкоуглеродистой стали 20X2H4A, полученных методом центробежного электрошлакового переплава / П. И. Папковский, А. Л. Валько, С. Г. Сандомирский // Литье и металлургия. 2020. № 1. С. 65–73. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-1-65-73>.

INFLUENCE OF NON-FERROUS METALS ON THE STRUCTURAL QUALITY OF THE HIGH-ALLOY MILD STEEL 20X2H4A BILLETS RECEIVED BY CENTRIFUGAL ELECTROSLAG REMELTING

*P. I. PAPKOVSKIY, A. L. VALKO, S. G. SANDOMIRSKII, Joint Institute of Mechanical Engineering of the
National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 12, Akademicheskaja str.
E-mail: sand_work@mail.ru*

The problem of the formation of cracks and the conditions of their origin in the cast of metal products have been widely studied in world practice, but the real mechanism of this process is not yet clear enough that it could be applied in production. Hot cracks – one of the most common and the most detrimental defects of steel castings, leading to a significant increase in the cost of products. The formation of hot cracks in steel castings depends on many factors, including the chemical composition of steel, the

presence of non-metallic inclusions and gases, conditions of deoxidation and solidification of steel, etc. Therefore, special attention in the real conditions of production should be given to the metallurgical side of the issue. There is no quantitative measure of steel purity in the books of steel, which is divided into chemical, defined by the chemical analysis, and metallographic, defined by the content of non-metallic inclusions. The effect of the general purity of steel on the characteristics of destruction is studied sufficiently, but the data on the individual impact of impurities is very incomplete.

In many respects, pure steel has a clear advantage over steel with harmful impurities. This applies to all mechanical properties associated with destruction or processes occurring on the edge of grains. The cardinal way of obtaining cleaner steel, including the reduction of impurities of non-ferrous metals, is the use of pure original charge mixture.

The article discusses the topical problem of cracking formation after chemical-thermal treatment in the material of sun gears of the second row of quarry dump trucks BELAZ, obtained by the method of CESR rolled steel 20X2H4A, the possible impact of small concentrations of non-ferrous metals (Pb, Zn, Sn, Bi, As, Se) on the development of external and internal cracks in castings and on structural heterogeneity of steel after CESR.

The obtained results allowed to draw conclusions about the impact of non-ferrous metals on the formation of cracks in castings and to establish their limited quantitative characteristics. Based on the results, measures have been proposed to minimize the impact of small amounts of non-ferrous metals on the formation of cracks in castings.

Keywords. Low alloy steel, metallurgical processes, chemical composition, impurities of non-ferrous metals, cracks, microstructure.

For citation. Papkovskiy P. I., Valko A. L., Sandomirskii S. G. Influence of non-ferrous metals on the structural quality of the high-alloy mild steel 20X2H4A billets received by centrifugal electroslag remelting. Foundry production and metallurgy, 2020, no. 1, pp. 65–73. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-1-65-73>.

Введение

Технический прогресс в металлургии происходит в условиях конкурентной борьбы на мировом рынке, основное требование которого – повышение потребительских свойств конечной продукции при одновременном снижении ее стоимости. Поэтому совершенствованию процессов получения литых металлов и заготовок из них уделяется особое внимание. Так как в технологической цепочке металлургического производства литейные агрегаты находятся в начальной стадии производства изделий, эффективность их работы во многом определяют качество и стоимость конечной продукции. Получение качественной по внутреннему строению литой заготовки зависит от химического состава скрапа, технологии плавки или переплава стали, технологических параметров разлива из сталеплавильного агрегата, определяющих условия затвердевания и кристаллизации стали. Важнейшими факторами, определяющими качество отливки, являются структура и химическая неоднородность материала. Наиболее благоприятной является однородная кристаллическая структура металла.

К качеству литых заготовок, из которых изготавливается металлопродукция особо ответственного назначения, предъявляются высокие требования по содержанию серы, фосфора, количественному составу и расположению неметаллических включений, растворенных газов (кислорода, азота, водорода), степени развития химической и структурной неоднородности, отсутствию наружных и внутренних дефектов типа трещин и др.

Цель статьи – анализ влияния малых концентраций цветных металлов на развитие наружных и внутренних трещин в отливках для разработки мероприятий по минимизации их воздействия.

Методика проведения исследований

Проведен литературный обзор трещиностойкости отливок с содержанием углерода от 0,11 до 0,33% с оценкой влияния на нее малых количеств цветных металлов.

Исследован фрагмент из двух зубьев шестерни солнечной второго ряда автомобиля БЕЛАЗ, изготовленной методом ЦЭШП стали 20X2H4A (ГОСТ 4543-2016. Металлопродукция из конструкционной легированной стали. Технические условия).

В качестве способа определения структурного качества материала использованы анализ химического состава стали и металлографический анализ.

Химический анализ стали проведен в ЦЗЛ ОАО «БЕЛАЗ» по ГОСТ 12344-2003 и ГОСТ 18895-97 с использованием анализаторов определения количества химических элементов АН-7529 и ARC-MET 930SP. Развернутый химический анализ стали проведен с помощью атомно-эмиссионного спектрометра с индуктивно связанной плазмой АКТИВА М (спектральный диапазон 160–800 нм, элементы от Li до U (исключая газы), предел обнаружения от 0,1 ppb).

Твердость стали HRC определяли на универсальном твердомере ТК-2М.

Металлографический анализ проводили методами темного и светлого поля на микроскопе NEO-PHOT 32 при различных увеличениях (от 50 до 500).

Результаты исследований и их обсуждение

Анализ причин появления трещин в отливках

Известны исследования и теории образования наружных горячих трещин в сталях с содержанием углерода от 0,11 до 0,33%, появление которых связано с температурными интервалами охлаждения и затвердевания стали, прилегающими к линии солидуса [1–3]. Горячие трещины могут образоваться как внутри, так и на поверхности отливки. Разрывы, в том числе и горячие трещины, есть результат деформаций, на которые решающее влияние оказывают величины усадки, степень краснотомкости металла отливки и сопротивление усадке [1]. Образование горячих трещин зависит одновременно от комплекса свойств литой стали – температурного интервала кристаллизации, линейной усадки, прочности и пластичности в области высоких температур. Эти свойства комплексно характеризуют трещиностойкость: способность стали принятого химического состава противостоять действию растягивающих напряжений. Однако только значение прочности в температурном интервале образования трещин не всегда может служить показателем склонности металла или сплава к трещинам [1, 4, 5]. Горячие трещины в стальных отливках образуются в процессе затвердевания, когда прочность стали очень низка. Возникновение их возможно и с началом линейной усадки, когда в промежутках между кристаллами еще имеются жидкие прослойки. Эти трещины имеют окисленную поверхность, всегда проходят вдоль границ первичных зерен, что указывает на образование их при высоких температурах, когда связи между кристаллитами всегда меньше, чем в объеме кристаллов [4]. Чем больше усадка металла, тем вероятнее образование горячих трещин. Ряд исследований показал, что наибольший коэффициент теплового расширения α или наибольший коэффициент сжатия металлы и сплавы имеют при температурах, близких к температуре затвердевания [1].

Исследования межкристаллитных изломов и волосовидных трещин, идущих по границам крупных кристаллов, выявили наличие трещин, вызванных растворенными в стали газами и избыточными присадками алюминия. Наибольшее влияние на трещиностойкость оказывает содержание углерода и серы даже в пределах заданного марочного состава [1,7].

В практике исследований трещинообразования основное внимание уделяется температурным интервалам кристаллизации металлов, наличию в них неметаллических составляющих, газов и только в редких случаях можно найти ссылки на исследования элементного состава материалов с незначительными количествами цветных металлов. Так, в работе [1] показано, что прочность образцов из железа, содержащего небольшие количества олова, висмута и меди, при температуре затвердевания получается резко пониженной. В работе [2] отмечено, что в связи со способностью примесей цветных металлов (Pb, Zn, Sn, Sb, Bi, As, Se) располагаться по границам дендритов и межосным пространствам в литом металле указанные примеси оказывают отрицательное влияние на трещиностойкость стали и показатели ударной вязкости. В работе [5] отмечено, что при содержании висмута 0,006%, свинца – 0,04, меди – 0,15, сурьмы и олова – 0,2% сталь утрачивает способность к пластической деформации при горячей обработке давлением и разрушается. В работах [7, 8] при изучении макроструктуры слитка установлено наличие поперечных и продольных трещин в металле плавок, содержащих повышенные концентрации висмута и свинца. Количество и развитие трещин возрастает с увеличением концентрации примесей цветных металлов. При исследовании опытных образцов методом оже-электронной спектроскопии в их спектрах с достаточной степенью достоверности наблюдаются оже-пики примесей цветных металлов. В образцах опытного металла, обработанного редкоземельными металлами (РЗМ), отмечено значительное снижение пиков спектров цветных металлов.

Одной из причин появления небольших дефектов (паутинообразных микротрещин), обнаруживаемых с помощью приборного контроля в наиболее нагруженных местах деталей, могло стать наличие олова. Олово является самым неблагоприятным элементом в составе конструкционной стали. Даже в виде небольшой примеси 0,05%, из-за низкой температуры плавления, олово приводит к появлению в материале «паяльной хрупкости» – явления возникновения зернограницной концентрации олова и образования трещин в широком диапазоне температур (рис. 1) [2, 5]. При исследованиях макро-

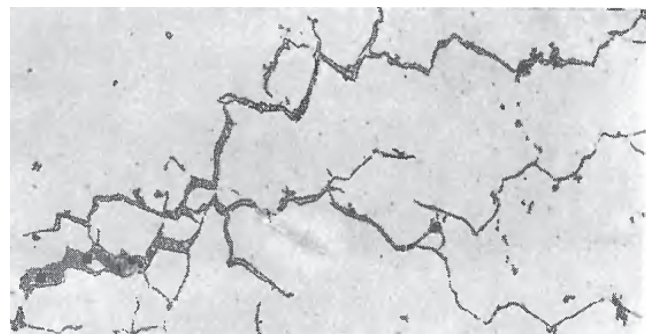


Рис. 1. Интеркристаллитные трещины в стали при наличии олова свыше 0,05%. $\times 50$

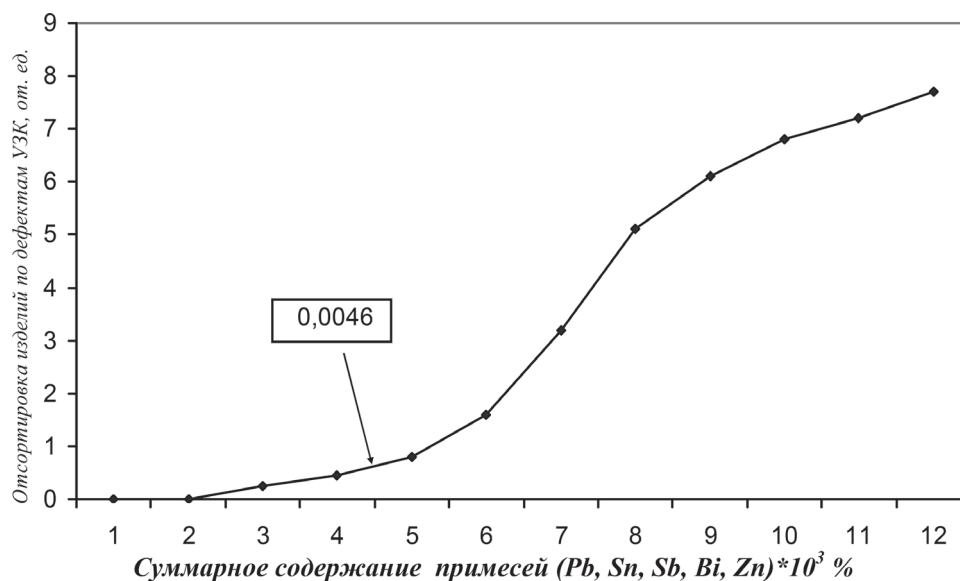


Рис. 2. Отсортировка листа в зависимости от содержания примесей [8]

структуры слитка с содержанием 0,0060% олова обнаруживаются развитые продольные и мелкие поперечные трещины [2]. Олово сильнее влияет на охрупчивание хромоникелевых сталей. Мышьяк в таких сталях оказывает такое же воздействие как олово, но несколько слабее. Загрязнение конструкционной стали Sn и Sb приводит к уменьшению пластичности стали и повышению порога хладноломкости [9]. На основании исследований делается вывод, что вышеуказанные элементы не должны присутствовать в литых сталях [7, 9, 10].

Сталь содержит ряд примесей цветных металлов, которые в большинстве случаев не определяются в элементном химическом анализе ковшовой пробы плавки. На фоне существенной очистки металла от серы и фосфора, неметаллических включений, растворенных газов (кислорода, азота, водорода) необходимо рассматривать вопросы снижения степени развития химической и структурной неоднородности в сталях и отсутствия внутренних трещин, возникающих из-за примесей накапливаемых и поступающих в составе скрапа цветных металлов. Актуальной задачей становится более глубокое изучение влияния Pb, Zn, Sn, Sb, Bi, As, Se на качественные показатели металлопродукции в заготовительном периоде производства.

В работе [7] установлено, что допустимое максимальное содержание примесей цветных металлов (Pb, Zn, Sn, Sb, Bi) в низколегированных сталях перитектического класса, которое не оказывает видимого влияния на внутреннее качество литого металла, не должно превышать 0,0046% (рис. 2). При анализе влияния примесей цветных металлов на качественные показатели литого металла было отмечено существенное воздействие повышенных концентраций цветных металлов на образование грубых внутренних поперечных трещин [7]. Для высокопрочных низколегированных сталей с содержанием углерода 0,13–0,23% предложена эмпирическая формула, определяющая предельную суммарную концентрацию примесей цветных металлов, свыше которой наблюдалось образование и развитие внутренних сквозных трещин в литой заготовке:

$$C_M \leq Sb\% + 0,75Pb\% + 0,50Sn\% + 0,10Zn\%. \quad (1)$$

Установлено, что величина C_M не должна превышать 0,0012 [7]. Для уменьшения негативного воздействия примесей цветных металлов целесообразно проводить обработку стали комплексными модификаторами и смесями, содержащими редкоземельные металлы с обеспечением остаточного содержания церия в металле в пределах 0,05–0,08% [7].

Особенности влияния примесей при электрошлаковом переплаве (ЭШП)

Одним из современных способов получения литых заготовок является процесс электрошлакового переплава (ЭШП), сочетающий в себе условия получения так называемой «чистой стали». Электрошлаковый процесс наиболее эффективен для десульфурации металла и снижения содержания кислорода, но малоэффективен для удаления из металла примесей с высокой упругостью пара, в том числе легкоплав-

ких, представляющих серьезную опасность и наносящих большой вред современным конструкционным сталям высокой и особо высокой прочности [11]. В работе [9] отмечено, что сплавы, приготовленные любыми способами, содержат в составе большое количество сопутствующих элементов. Тем не менее, качество стали издавна оценивали по содержанию только серы и фосфора. Современные металлургические процессы уменьшают загрязненность стали вредными элементами, уменьшают и изменяют в лучшую сторону неметаллическую составляющую в структуре стали. Кардинальным способом получения стали более чистой по примесям цветных металлов является применение чистой первичной (первородной) шихты, в принципе исключающей загрязнение металла трудноудаляемыми примесями. Поэтому повсеместно осуществляется переход на электрошлаковую плавку и переплав исходного металла повышенной чистоты по фосфору и легкоплавким примесям [9, 11].

Одним из видов ЭШП является центробежный электрошлаковый переплав (ЦЭШП). При этом виде переплава формирование заготовки и ее кристаллизация происходят под действием центробежных сил. Расплавленный шлак вовлекается во вращение, отбрасывается на периферию кокиля и покрывает его боковую поверхность, образуя слой гарнисажа. После шлака, а частично вместе с ним, во вращающийся кокиль поступает жидкий металл. Металл проходит сквозь жидкий шлак и растекается по гарнисажу, оттесняя от него к оси вращения заготовки оставшийся в жидком состоянии шлак, как более легкий. Следует отметить благоприятное влияние центробежных сил на процесс кристаллизации металла заготовок благодаря интенсивной подпитке жидким металлом фронта кристаллизации. Металл под действием центробежной силы подается в двухфазную зону кристаллизующейся заготовки, заполняя поры и рыхлоты усадочного происхождения, что способствует формированию плотной кристаллической структуры у центробежных электрошлаковых отливок [11].

Анализ условий производства заготовок солнечных шестерен автосамосвалов БЕЛАЗ

Заготовки солнечных шестерен второго ряда РМК автосамосвалов БЕЛАЗ до последнего времени изготавливали из высоколегированной хромоникелевой стали 20X2H4A (ГОСТ 4543-2016) с использованием ЦЭШП.

Сталь 20X2H4A предназначена для цементуемых особо ответственных высоконагруженных деталей оборонной промышленности, горношахтного оборудования и др., к которым предъявляются требования высокой прочности, пластичности и вязкости сердцевины и высокой поверхностной твердости, работающих под действием ударных нагрузок или при отрицательных температурах. Выполнение этих требований и уменьшение деформации для стали 20X2H4A достигают специальной термической обработкой: цементация – 920–950 °С, нормализация – 900–920 °С или закалка – от 880–920 °С, отпуск – 630–660 °С, закалка – от 780–820 °С в масло, отпуск – 150–200 °С [12]. Такая термообработка при изготовлении из стали 20X2H4A солнечных шестерен второго ряда РМК автосамосвалов БЕЛАЗ оказалась энергозатратной. В связи с этим в производстве неоднократно разрабатывались разные технологические процессы нормализации и отжига для улучшения ее обрабатываемости.

В процессе изготовления зубчатых колес нередко случавшийся после операций ХТО и шлифования брак в виде межкристаллитных и других видов трещин объясняли повторными нормализациями и отжигами для улучшения механической обработки, повторными закалками для повышения твердости после ХТО, пережогами при шлифовании и другими причинами.

В ЦЗЛ ОАО «БЕЛАЗ» при поступлении стали 20X2H4A проверяют соответствие данных химического анализа требованиям ГОСТ 4543-2016, в котором отражается содержание основных элементов (С, Mn, Si, Cr, Ni) массовой доли фосфора, серы, остаточной меди, неметаллических включений и др. О возможном наличии в составе данной стали таких элементов, как свинец, висмут, цинк, олово, сурьма, мышьяк, селен и др., не упоминается. Только имеется ссылка «Дополнительные требования к металлопродукции устанавливаются по согласованию изготовителя с заказчиком».

Анализ металлургического состояния и качества металла шестерен

Обратим внимание на металлургическое состояние и качество металла в настоящее время. При любых процессах выплавки стали не удастся избавиться от накопления остаточных элементов многих цветных металлов [9]. По ГОСТ 4543-2016 химический состав стали должен соответствовать анализу ковшовой пробы по указанным нормам в табл. 1. В таблице также приведен химический состав фрагмента шестерни из стали 20X2H4A, определенный в ЦЗЛ ОАО «БЕЛАЗ».

Таблица 1. Химический состав стали 20X2H4A по ГОСТ 4543-2016 и исследуемого фрагмента шестерни

Марка стали	Массовая доля элементов, %							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Cu
20X2H4A, ГОСТ 4543-2016	0,16–0,22	0,17–0,37	0,30–0,60	1,25–1,65	3,25–3,65	≤0,025	≤0,025	≤0,30
Фрагмент шестерни	0,19	0,28	0,46	1,32	3,12	0,009	0,015	0,2

По форме заготовки солнечной шестерни второго ряда и ее расположению в кокиле центробежной машины при электрошлаковом переплаве (рис. 3), а также физической сущности работы центробежной машины представляется, что при заливке жидкого расплава металла в кокиль (в начальный период кокиль работает на малых оборотах) более тяжелые химические элементы, а именно свинец и висмут (табл. 2), будут смещаться к днищу кокиля, а при его раскрутке за счет центробежных сил – к периферии заготовки от низа до шейки в средней части кокиля.

Таблица 2. Свойства цветных металлов

Показатель	Pb	Sn	Sb	Bi	Zn	As	Se
Плотность при 20 °С, г/см ³	11,34	7,30	6,68	9,8	7,14		
Плотность расплава, г/см ³	10,30	6,98	6,55	10,1	6,70	5,74	4,8
Температура плавления, °С	327,4	231	630,5	271,3	419,5	817*	217
Температура кипения, °С	1740	2200	1640	1560	907	609,85	685
Коэффициент линейного расширения, $\alpha \times 10^{-6}$ при 20 °С на 1 °С	29,5	22,4	11,29	13,45	32,5		

Плотность стали 20X2H4A при 20 °С 7,85 г/см³.

* Под давлением.

Более легкие химические элементы, а именно цинк, олово, сурьма (табл. 2) и др., будут размещаться по всему объему жидкого расплава и ближе к центру отливки. Следует отметить, что нижняя наружная часть заготовки солнечной шестерни является зубчатым венцом солнечной шестерни.

Анализ причин возникновения трещин в исследуемой заготовке

Предварительное исследование образования трещин в солнечной шестерне второго ряда, изготовленной методом ЦЭШП из стали 20X2H4A (поставщик – ЗАО «ВМК КО», г. Волгоград), проводили с использованием фрагмента двух зубьев, вырезанного после операции шлифования. Внешним осмотром фрагмента шестерни выявлены волосовидные трещины, распространяющиеся от наружной поверхности в глубину зуба и обода шестерни (рис. 4). Исследования микроструктуры проводили методами темного и светлого поля при увеличениях 50 и 500. В темном поле отмечено наличие незначительного количества мелких оксидов точечных 2-го балла, ГОСТ 1778-70 (рис. 5).

Микроструктура, выявленная травлением в 4%-ном растворе азотной кислоты в спирте, характеризуется ликвационной неоднородностью литого металла (рис. 6). Ликвация обусловлена тем, что разные участки расплава кристаллизуются не при одной температуре, а в интервале температур. Это особенно ярко отмечается вдоль трещин (рис. 7).



Рис. 4. Форма трещин в литом металле фрагмента шестерни. $\times 50$

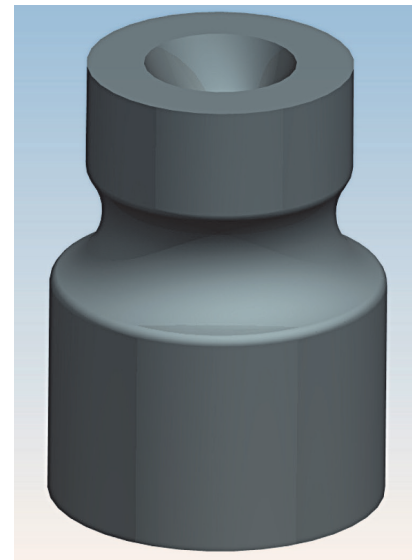


Рис. 3. Общий вид заготовки солнечной шестерни и ее расположение в кокиле центробежного агрегата

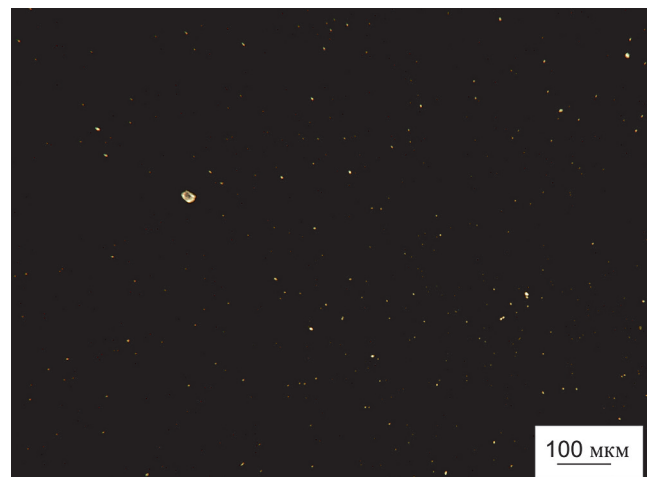


Рис. 5. Оксиды точечные 2-го балла по ГОСТ 1778-70, выявленные методом темного поля. $\times 100$

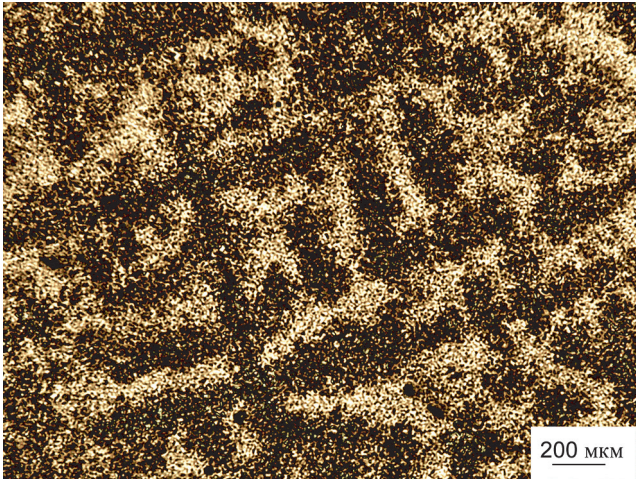


Рис. 6. Ликвационная структура литого металла фрагмента шестерни. $\times 50$

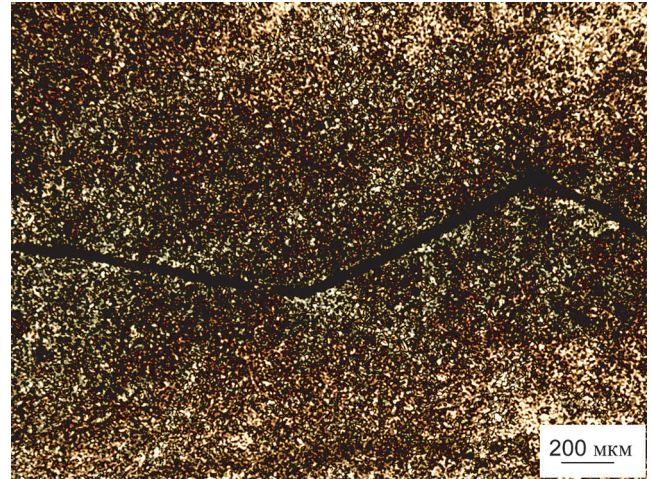


Рис. 7. Выраженная ликвационная неоднородность на пути развития трещины. $\times 50$

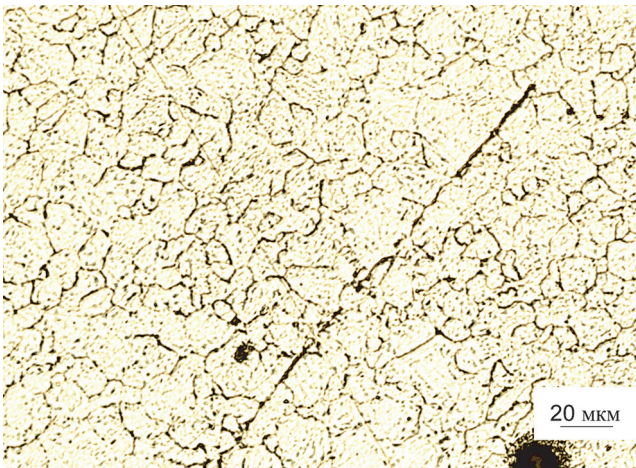


Рис. 8. Начальное зарождение трещины преимущественно по границам действительного зерна. $\times 500$

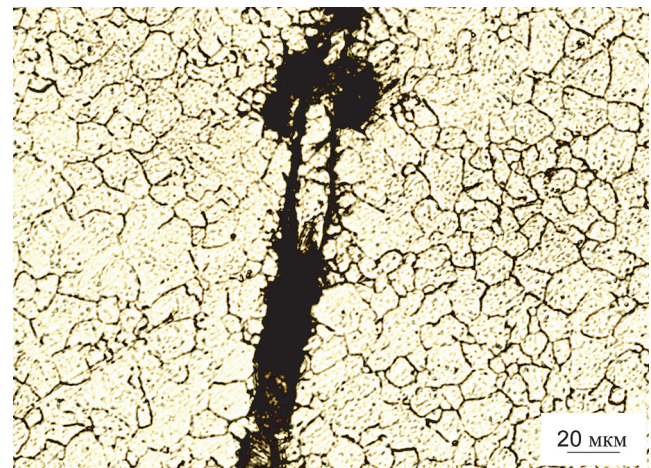


Рис. 9. Расслоение металла под действием растягивающих напряжений, возникающих на финишных стадиях термообработки. $\times 500$

При этом состав кристаллов, образующихся в начале затвердевания, может существенно отличаться от состава последних участков кристаллизующегося маточного раствора [13].

Травление с использованием реактива [14] позволило выявить границы зерен, причем средняя величина зерна не превышает 20 мкм, что соответствует № 8 по ГОСТ 5639 при допуске по общепринятым требованиям не грубее № 6. На рис. 8 показано начало зарождения трещины, которая в дальнейшем своем развитии под действием растягивающих напряжений расширяется за счет разрыва металла преимущественно по границам зерна (рис. 9). Твердость сердцевины зуба – 38–43 HRC. Химический состав металла фрагмента шестерни (см. табл. 1) соответствует ГОСТ 4543-2016 с незначительным занижением массовой доли по никелю.

Анализ и состояние сталей разных поставщиков по примесям цветных металлов

Данные развернутого атомно-эмиссионного спектрального анализа состава исследуемого фрагмента шестерни из стали 20X2H4A (табл. 3) указывают на присутствие в нем Pb, Zn, Sn, Sb, Bi, As, Se [15].

Т а б л и ц а 3. Развернутый химический состав фрагмента шестерни

Марка стали	Массовая доля элементов, %												
	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Ti	V
20X2H4A, ЗАО «ВМККО», г. Волгоград	0,194	0,277	0,464	0,014	0,007	0,0007	1,327	3,126	0,063	0,194	0,014	0,003	0,006
	Nb	W	Co	Zr	B	Ca	Sb	As	Sn	Pb	Zn	Bi	Se
	0,010	0,045	0,024	0,003	0,0002	0,0011	<0,001	0,007	0,009	0,006	0,003	0,006	0,007
$C_M = 0,019$													

Отмечено, что суммарное содержание примесей цветных металлов (Pb, Zn, Sn, Sb, Bi) в низколегированных сталях перитектического класса не оказывает видимого влияния на внутреннее качество литого металла при наличии их ниже 0,0046% (см. рис. 2) [7, 8].

Расчет по эмпирической формуле (1), определяющей предельную суммарную концентрацию примесей цветных металлов, свыше которой наблюдается образование и развитие внутренних сквозных трещин в литой заготовке, подтвердил наличие более чем десятикратного превышения допустимого количества цветных металлов в исследуемом фрагменте шестерни из стали 20X2H4A ($C_M = 0,019$) и связь наличия цветных металлов с образованием трещин в материале детали.

Сопоставление величины допустимого максимального суммарного содержания C_M примесей цветных металлов (Pb, Zn, Sn, Sb, Bi) и суммарного их содержания в конструкционных и инструментальных сталях металлургических комбинатов «Днепроспецсталь», «БМЗ» и «Ижсталь» также показало повышенное содержание этих примесей [15]. Однако оно менее существенное, чем для исследуемой стали 20X2H4A (табл. 4).

Т а б л и ц а 4. Содержание цветных металлов в сталях «Днепроспецсталь», «БМЗ» и «Ижсталь»

Металлургический комбинат	Марка стали	Номер образца	Массовая доля элементов, %						
			Sb	Bi	Sn	Pb	Zn	$\Sigma \leq 0,0046\%$	$C_M \leq 0,0012\%$
«Днепроспецсталь»	4X5MФС	44502	0,001	–	0,005	0,001	0,005	0,0120	0,00475
	40XН2МА	42816	–	–	0,012	–	–	0,0120	0,0060
«БМЗ»	19ХГНМА	941	<0,001	0,003	0,010	0,002	0,002	0,0170	0,0067
	19ХГНМА	942	<0,001	0,004	0,012	0,002	0,003	0,0210	0,0210
	19ХГНМА	957	<0,001	0,003	0,014	0,005	0,003	0,0230	0,00955
	14X2H3M	958	<0,001	0,007	0,012	0,006	0,003	0,0280	0,0108
«Ижсталь»	21ХГНМА	10947	<0,001	0,005	0,007	0,003	0,003	0,0180	0,0060
	21ХГНМА	11083	<0,001	0,005	0,007	0,003	0,004	0,0190	0,0061
	21ХГНМА	10039	<0,001	0,002	0,005	0,001	0,002	0,0090	0,0027
	21ХГНМА	10097	<0,001	0,004	0,006	0,003	0,003	0,0160	0,0058
	21ХГНМА	–	<0,001	–	0,001	0,002	–	0,003	0,002
	20ХГНМБА-В	–	<0,001	–	0,001	<0,001	–	0,001	0,0005

Литературный обзор трещиноустойчивости отливок с содержанием углерода от 0,11 до 0,33% и влияние на нее малых количеств цветных металлов, микроструктурные исследования стали 20X2H4A и анализ развернутых химических составов конструкционных сталей позволяют сделать следующее.

Выводы

1. Установлена связь наличия цветных металлов по расчетной эмпирической формуле и трещинообразования в материале детали, полученной из литой заготовки.

2. Установлены количественные характеристики примесей цветных металлов (свинца, олова, цинка, сурьмы и висмута) в составе исследованного фрагмента шестерни, оказывающих воздействие на развитие внутренних трещин, и наличие скоплений примесных элементов по траектории развития в нем трещины. Суммарная концентрация максимально допустимого содержания примесей цветных металлов в исследуемом фрагменте шестерни ($C_M = 0,019$) на порядок превышает допустимую норму 0,0012%.

3. Второй причиной образования трещин в фрагменте шестерни солнечной второго ряда, изготовленной методом ЦЭШП стали 20X2H4A (поставщик проката стали 20X2H4A – ЗАО «ВМК КО», г. Волгоград), является наличие в структуре ликвационной неоднородности вследствие отсутствия последующей горячей деформационной обработки литой структуры.

4. На основании выявленной связи наличия примесей цветных металлов и трещинообразования в материале детали и в соответствии с ГОСТ 4543-2016 необходимо устанавливать и согласовывать с изготовителем при заказе металлопроката количественное ограничение в его составе цветных металлов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыжиков А. А. Теоретические основы литейного производства / А. А. Рыжиков. М.; Свердловск: ГНТИ Машиностроительной литературы, 1961. 444 с.
2. Нехендзи Ю. А. Стальное литье / Ю. А. Нехендзи. М.: Металлургиздат, 1948.
3. Горшков А. А. Сб. «УОНИТОЛЬ» / А. А. Горшков. М.; Свердловск: Машгиз, 1950.

4. Василевский П. Ф. Технология стального литья / П. Ф. Василевский. М.: Машиностроение, 1974. 408 с.
5. Трубицин Н. А. Влияние состава стали на образование горячих трещин в отливках / Н. А. Трубицин, П. Н. Бидуля // Литейное производство. 1958. № 6. С. 22–26.
6. Чаус А. С. Модифицирующий эффект висмута в литых быстрорежущих сталях / А. С. Чаус // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2000. № 2. С. 10–17.
7. Исаев О. Б. Создание комплексной технологии улучшения внутреннего строения непрерывнолитого сляба из низколегированных сталей: автореф. дис. ... д-р техн. наук. М., 2010. 43 с.
8. Исаев О. Б. Влияние углерода и малых концентраций примесей цветных металлов на качество непрерывнолитой заготовки / О. Б. Исаев // Metallurg. 2009. № 9. С. 68–72.
9. Гуляев А. П. Чистая сталь / А. П. Гуляев. М.: Metallurgiya, 1975. 184 с.
10. Морозенко С. Г. Влияние меди на свойства стали Р6М5 / С. Г. Морозенко, Б. Э. Натанов // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. 1990. № 5. С. 42–45.
11. Медовар Б. И. Metallurgiya elektroshlakovogo processa / Б. И. Медовар А. К. Цыкуленко, В. Л. Шевцов и др. Киев: Наукова думка, 1986. 248 с.
12. Сорокин В. Г. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова и др. М.: Машиностроение, 1989. 640 с.
13. Артоболевский И. И. Политехнический словарь / И. И. Артоболевский. М.: Советская энциклопедия, 1976. 608 с.
14. Металлографический реактив для выявления границ действительного зерна стали: пат. 14748 Респ. Беларусь, МПК С 23F 1/28 (2006.01) / А. Л. Валько, С. П. Руденко, А. А. Шипко и др.; заявитель ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси». № а 20100154; заявл. 04.02.2010; опубл. 30.08.2011. // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэл. уласнасці. 2012. № 4.
15. Папковский П. И. О возможной причине образования трещин в деталях, полученных центробежным электрошлаковым переплавом / П. И. Папковский, А. Л. Валько, С. Г. Сандомирский, Д. О. Войтович // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. 2019. Вып. 8. С. 333–335.

REFERENCES

1. Ryzhikov A. A. *Teoreticheskie osnovy liteynogo proizvodstva* [Theoretical bases of Foundry]. Moscow-Sverdlovsk, GNTI Mashinostroitelnoy literature Publ., 1961. 444 p.
2. Nehendzi Y. A. *Stalnoe litye* [Steel castings]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1948.
3. Gorchkov A. A. *Sb. «UONITOL»* [sat. «UONITOL»]. Moscow-Sverdlovsk, Mashgiz Publ., 1950.
4. Vasilevskiy P. F. *Technologiya stalnogo litya* [Technology of steel casting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 408 p.
5. Trubicin N. A. *Vliyeniye sostava stali na obrazovanie goryachih treshchin v otlivkah* [Effect of steel composition on education hot cracks in castings]. *Liteynoye proizvodstvo = Foundry*, 1958, no. 6, pp. 22–26.
6. Chaus A. S. *Modifiziruyushchiy effect vismuta v lityh bystrorezyshchih stalyah* [Modifies the effect of bismuth in cast high-speed steels]. *Vesti NAN Belarusi. Ser. fiz.-tekhn. nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical series*. 2000, no. 2, pp. 10–17.
7. Isaev O. B. *Cosdanie kompleknoy tehnologii uluchsheniya vnutrennego ctroeniya nepreryvnolitogo clyaba is niskolegированной stali. Avtoref. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Establishment of integrated technologies to improve internal structure of nepreryvnolitogo slab of low alloy steels. Dr. tech. sci. diss]. Moscow, 2010, 43 p.
8. Isaev O. B. *Vliyeniye ugleroda i малыh kontsentratsiy primecey tsvetnyh metallov na kachestvo nepreryvnolitoй sagotovki* [Influence carbon and small impurity concentrations of non-ferrous metals on the quality of continuously cast billets]. *Metallurg = Metallurgist*, 2009, no. 9, pp. 68–72.
9. Gulyaev A. P. *Chistaya stal* [Pure steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1975. 184 p.
10. Morozenko S. G. *Vliyeniye medi na svoystva stali P6M5* [Influence of copper on properties of High-speed steel]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal Science and heat Treatment of metals*, 1990, no. 5, pp. 42–45.
11. Medovar B. I. *Metallurgiya elektroshlakovogo processa* [Metallurgy of electroslag process]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1986. 248 p.
12. Sorokin V. G., Volosnikova A. V., Vyatkin S. A., Gervasev M. A., Greditor M. A., Krylova K. M., Kubachek V. V., Mirmelshteyn V. A. *Marochnik staley i spлавov* [Marochnik steels and alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 640 p.
13. Artobolevskiy I. I. *Politehnicheskiy clovar* [Polytechnical dictionary]. Moscow, Sovetskaya Entsiklopediya Publ., 1976. 608 p.
14. Val'ko A. L., Rudenko S. P., Shipko A. A. *Metallograficheskiy reaktiv dlya vyyavleniya granits deystvitelnogo zerna stali* [Metallographic reagent to identify the boundaries of the actual grain of steel]. Patent Belarus, no. 14748, 2012.
15. Papkovskiy P. I., Valko A. L., Sandomirskiy S. G., Voytovich D. O. *O vosmozhnoy prichine obrazovaniya treshchin v detalyah, poluchennyh zentrobezhnym elektroshlakovym pereplavom* [On the possible cause of cracks in the details obtained by the centrifugal electric slag smelt]. *Aktualnye voprosy machinovedeniya = Major Aspect of machine Science*, 2019, no. 8, pp. 333–335.