

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 620.184/.186
DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-1-48-59



ВЛИЯНИЕ ИСХОДНОЙ ЛИТОЙ СТРУКТУРЫ НА КАЧЕСТВО ГОРЯЧЕКАТАНОГО ПРОКАТА ДОЭВТЕКТОИДНОЙ СТАЛИ

Хлыбов А.А., Ворожева Е.Л.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Началом научного изучения строения литого металла принято считать первые металлографические работы русского металлурга и металловеда, учёного Д.К. Чернова. Дмитрий Константинович Чернов в мельчайших деталях исследовал процесс зарождения и роста кристаллов при затвердевании жидкого металла, дал схему структурных зон стального слитка, развел теорию последовательной кристаллизации, всесторонне изучил дефекты литой стали [1], изложил результаты своих исследований и необходимость изучения внутреннего качества литого металла в историческом сообщении «Исследования, относящиеся до структуры литьих болванок», адресованному в адрес императорского Русского технического общества 2 декабря 1878 года. Современная техническая литература по металлургической науке содержит большое количество разрозненных научных исследований в области качества непрерывнолитой стальной заготовки и эволюции литого металла в ходе горячей прокатки. Имеются отечественные, иностранные книги, учебники, а также многочисленные сборники трудов конференций и статьи с исследованиями структурной и химической неоднородности непрерывнолитой углеродистой стали. В данной статье собрана и представлена целостная информация о влиянии металлургической наследственности на структуру и механические свойства доэвтектоидной стали при последующей горячей прокатке. Приведены данные о развитии макроскопических, металлографических, инструментальных методов изучения химической и структурной неоднородности непрерывнолитой стали. Сопоставлены классические и современные методы исследования.

Ключевые слова: макроструктура, сляб, сегрегация, микроструктура, доэвтектоидная сталь, прокат.

© Хлыбов А.А., Ворожева Е.Л., 2021

Для цитирования

Хлыбов А.А., Ворожева Е.Л. Влияние исходной литой структуры на качество горячекатаного проката доэвтектоидной стали // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №1. С. 48–59. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-1-48-59>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

INFLUENCE OF THE INITIAL CAST STRUCTURE ON THE QUALITY OF HOT ROLLED HYPOEUTECTOID STEEL

Khlybov A.A., Vorozheva E.L.

Alekseev Nizny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The first metallographic studies of D.K. Chernov, the Russian metallurgist, metal scientist, are considered to be the beginning of the scientific study on the structure of cast metal. Dmitry K. Chernov in meticulous detail studied the process of crystal formation and growth within the solidification of liquid metal, gave a diagram of the structural zones of steel ingots, and developed the theory of successive crystallization, comprehensively studied the defects of cast steel [1], and outlined the results of his research and the necessity of studying the internal quality of cast metal in the historical message "Studies related to the structure of cast ingots" addressed to the Imperial Russian Technical Society on December 2, 1878. The modern technical literature on metallurgical science contains a lot of different scientific studies in the field of the quality of continuously cast steel billets and the evolution of cast metal during hot rolling. There are domestic and foreign books and textbooks, as well as numerous collections of conference proceedings and papers containing studies on the structural and chemical heterogeneity of continuously cast carbon steel. This paper presents comprehensive information about the influence of metallurgical heredity on the structure and mechanical properties of hypoeutectoid steel during subsequent hot rolling. The presented data show the development of macroscopic, metallographic, and instrumental methods for studying the chemical and structural heterogeneity of continuously cast steel. Classical and modern research methods are compared.

Keywords: macrostructure, slab, segregation, microstructure, hypoeutectoid steel, rolled products.

For citation

Khlybov A.A., Vorozheva E.L. Influence of the Initial Cast Structure on the Quality of Hot Rolled Hypoeutectoid Steel. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 1, pp. 48–59. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-1-48-59>

Введение

Создание технологии непрерывной разливки металлов и оборудования для ее реализации явилось одним из наиболее крупных достижений промышленности в XX веке и оказало существенное влияние на развитие металлургии и машиностроения, существенно изменила структуру сталеплавильного и прокатного производства, способствуя развитию средств контроля и автоматизации [2, 3, 49] и активному исследованию микроструктуры непрерывнолитых заготовок.

По мере развития и распространения непрерывной разливки стали разработаны методы изучения в промышленных условиях внутреннего качества литьих заготовок, такие как: метод снятия серных отпечатков по Бауману и травление макротемплетов в кислотах. Недостатком метода снятия серных отпечатков по Бауману является чувствительность при пониженном содержании серы. Для сталей с содержанием серы менее 0,006% он не может быть использован для оценки внутреннего строения металла. Поэтому для выявления макроструктуры в сталях с пониженным содержанием серы применяют методы, основанные на использовании для травления различных реактивов [7]. В

прошлом столетии преимущественным способом массового контроля осевой химической неоднородности сляба являлся отраслевой стандарт 14-4-73 со схематическими шкалами и описанием дефектов. ОСТ 14-4-73 отменён в соответствии с программой национальной стандартизации на 2017 год. До настоящего времени выявление макроструктуры в заводских лабораториях выполняют травлением в кислотах по методам, указанным в действующем ГОСТ 10243-75 «Метод испытаний и оценки макроструктуры». Наиболее распространённым реагентом для выявления литьей структуры углеродистых сталей является травление темплетов от непрерывнолитых слябов в водном растворе соляной кислоты, разогретом до температур 60–80°C. Интересно заметить, что Д.К. Чернов считал выявление литьей структуры травлением в кислотах не основным способом изучения литього металла и писал в своих трудах «Сталелитейное дело»: «Растворение стали в кислотах может предоставить отдалённый, косвенный способ определения кристаллической массы» [1].

Известно, что при кристаллизации непрерывнолитого сляба формируется химическая неоднородность или сегрегации как в результате дендритной ликвации в микрообъемах, так и при зо-

нальной ликвации в макрообъемах. Затвердевание приводит к макроскопическому и микроскопическому разделению химических элементов между исходной жидкостью и растущими твердыми кристаллами, создавая неоднородность в распределении химических элементов, которая наследуется в полностью затвердевших литых изделиях. Ликвационные явления, обусловленные развитием вынужденных и естественных конвективных потоков, усиленными механическим воздействием на оболочку заготовки, обогащают остаточный расплав примесями [7]. Разделение или сегрегация химических элементов на макроскопическом уровне происходит на осевой линии непрерывнолитых заготовок. Зональные сегрегации, сосредоточенные в центре сляба, образуют известную осевую химическую неоднородность сляба, трансформирующуюся при прокатке в ликвационную полосу штрипса [4, 6, 8]. Кристаллизация расплава в ходе разливки, в свою очередь, в определенной мере влияет на общую чистоту, определяет химическую неоднородность, вязкость, сопротивление сероводородному растрескиванию (HIC), центральную пористость (возможное последующее осевое расслоение), качество поверхности проката [9]. Дефекты, возникающие при кристаллизации или неисправимы, или требуют очень больших затрат на их устранение на последующих металлургических переделах [7].

Помимо химической неоднородности после кристаллизации в слябе формируется структурная неоднородность, связанная как с ликвационными процессами, так и с теплофизическими условиями затвердевания, определенными тепловой работой кристаллизатора и зоной вторичного охлаждения [6].

Цель работы заключается в изучении параметров непрерывнолитой структуры и их влиянии на микроструктуру и свойства горячекатаного проката.

Влияние исходного литого строения на микроструктуру и механические свойства горячекатаного проката

Как правило, считается, что для углеродистых сталей подогрев травильного раствора является обязательной операцией, обеспечивающей надежное выявление макроструктуры в литых заготовках. В немецком стандарте SEP 1611 (1-е издание, 1-я редакция, октябрь 2018) «Оценка осевой ликвации непрерывнолитых слябов» описан метод травления растворами пероксодисульфата аммония при комнатной температуре.

С целью оценки применимости альтернативного метода травления, исключающего операцию подогрева реактива, была отобрана проба от непрерывнолитого сляба доэвтектоидной низколегированной стали. Проба в сечении подготовлена тонким фрезерованием и пропараллена погружением в водный раствор пероксодисульфата аммония при комнатной температуре. После 10-минутной выдержки на контрольном сечении литого металла выявилась макроструктура. Эксперимент показал, что травление при комнатной температуре в водном растворе пероксодисульфата аммония полностью обеспечивает выявление дендритной структуры, не уступающего по качеству «горячему травлению». На **рис. 1** приведена макроструктура непрерывнолитого сляба, выявленная в двух различных реактивах. В сечении различается поверхностная быстроохлаждённая зона из мелких равноосных кристаллов, промежуточная зона столбчатых дендритов и центральная зона равноосных кристаллов. Выявленные внутренние дефекты макроструктуры являются сопоставимыми с оценкой дефектов после «горячего» травления. В осевой зоне макроструктуры присутствует осевая химическая неоднородность и осевая пористость.



а



б

Рис. 1. Макроструктура в поперечном сечении непрерывнолитого сляба: а – травление при температуре 70–80°C в водном растворе соляной кислоты; б – травление при комнатной температуре в водном растворе пероксодисульфата аммония

Fig. 1. Macrostructure in the transverse section of a continuously cast slab: а is etching at 70–80°C in an aqueous solution of hydrochloric acid, б is etching at room temperature in an aqueous solution of ammonium peroxodisulfate

В низкоуглеродистых сталях дендриты, которые образуются в самом начале затвердевания, состоят из δ -феррита, который впоследствии превращается в аустенит, а затем в феррит и перлит [26]. Для исследования микроструктуры сляба доэвтектоидной низколегированной стали изготовлен металлографический шлиф и проравлен в нитале. Ферритно-перлитная смесь в микроструктуре непрерывнолитой заготовки доэвтектоидной стали представляет собой грубоигольчатое строение видманштеттовой ориентировки и крупные глобулярные зёरна (рис. 2).



Рис. 2. Микроструктура в сечении у поверхности непрерывнолитого сляба

Fig. 2. Microstructure in a cross section along the surface of a continuously cast slab

В макроструктуре непрерывнолитой заготовки, выявленной травлением в растворах, принято считать, что обогащение или обеднение осевой зоны заготовки ликвидирующими примесями выявляется по степени травимости плоскости темплета. В зависимости от условий кристаллизации дефект может иметь вид точек, локальных пятен повышенной или пониженной травимости. При большей травимости происходит потемнение осевой зоны (положительная сегрегация элементов), при меньшей – осевая зона светлее, чем основной металл (отрицательная сегрегация элементов). Результатом оценки макроструктуры является балл внутреннего дефекта, присвоенный в соответствии с описанием и визуальным сравнением со шкалами нормативного документа. Стандартные шкалы не в полной мере отражают сегрегацию элементов в стали, так как её микроструктурное проявление может быть неявным или совсем отсутствовать [13]. К тому же для изучения химической структуры сляба метод визуального сравнения со шкалами не является универсальным и эффективным, отсутствуют

количественные и качественные характеристики химических элементов. Авторы, стремящиеся в своих публикациях изучить химическую и структурную неоднородность литого металла, не ограничиваются визуальным сравнением со шкалами, в своих исследованиях используют коммерческие программные продукты [4, 8, 14, 17, 19, 23] и различные инструментальные методы, к которым преимущественно относится количественный химический анализ [15, 19, 23], количественная металлография для измерения дисперсности литой структуры с применением оптической микроскопии [8], микрорентгеноспектральный метод для измерения содержания элементов в междендритных пространствах и по месту различных структур.

Часто для анализа полученной выборки результатов спектрального анализа по сечению слябов, оценки химической неоднородности и выявления наиболее ликвидирующих элементов исследователи [7, 16–18] используют параметр, называемый коэффициентом сегрегации либо степенью зональной химической неоднородности.

С целью получения количественных и качественных параметров химической неоднородности непрерывнолитого сляба доэвтектоидной низколегированной стали выполнено измерение содержания химических элементов удобным методом атомно-эмиссионного спектрального анализа. Химический состав измеряли в $\frac{1}{4}$ толщины со стороны широких граней. В середине толщины химический состав исследовали послойно с шагом 1 мм. Результат рассчитывали как среднее значение по трёх-четырём параллельным замерам в одной плоскости. Всего выполнено не менее 18 измерений основных легирующих и примесных элементов по толщине каждого темплета. Оценку сегрегации выполнили с применением параметра: коэффициент сегрегации, рассчитанный как отношение содержания элемента в слябе к его плавочному содержанию в ковшевой пробе. В слябе со слабо выраженной осевой зоной, оценённой по стандартным шкалам как 0,5 балла, коэффициенты сегрегации основных элементов и примесных элементов – близкие к единице. В слябе с химической неоднородностью в виде сплошной полосы и тёмных точек, оценённой в 3,5 балла, коэффициент сегрегации серы в середине толщины сляба достигает 1,6 (рис. 3). Визуальная оценка химической неоднородности и коэффициент сегрегации химических элементов явились сопоставимыми параметрами.

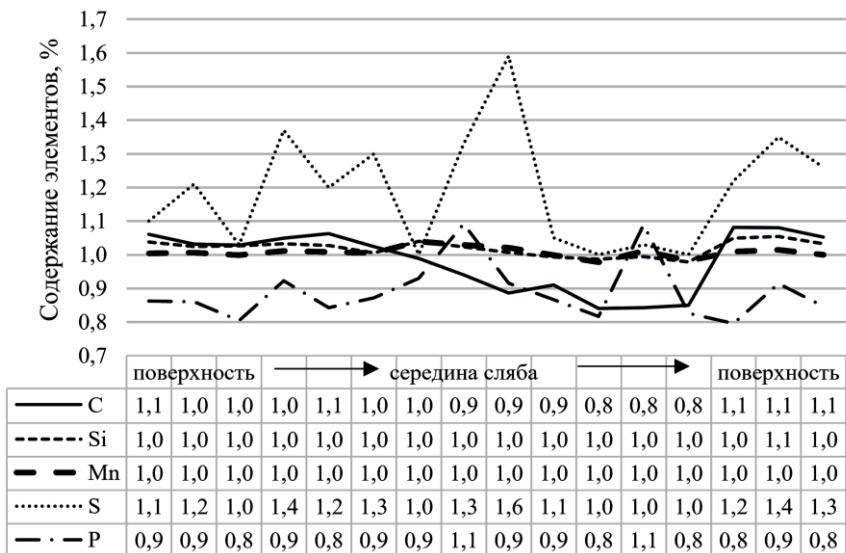


Рис. 3. Коэффициенты сегрегации Kc (отношение содержания элемента в слябе к его плавочному содержанию в ковшевой пробе)

Fig. 3. Segregation coefficients Kc (the ratio of the element content in the slab to its melting content in the ladle sample)

Согласно [10] при недостаточной проработке структуры в процессе горячей пластической деформации при последующей прокатке происходит наследование структурой листа осевой рыхлости и химической неоднородности литого металла, что может служить причиной снижения работы удара и относительного сужения в направлении толщины листа.

С целью наблюдения наследования осевой зоны макроструктурой проката от непрерывнолитого сляба низкоуглеродистой стали, подвергнутого горячей обработкой давлением с относительной степенью обжатия $\sim 90\%$, сечение проката подготовлено холодной механической обработкой и проправлено в водном растворе соляной кислоты при температуре 70°C . После травления в макроструктуре проката выявились осевые линии повышенной травимости, характеризующие остаточную осевую ликвационную неоднородность (рис. 4).



Рис. 4. Вид наследуемой осевой зоны в прокатанном металле

Fig. 4. The inherited form of the axial zone in rolled metal

От проката изготовлены образцы и выполнено испытание на ударный изгиб падающим грузом при комнатной температуре по ГОСТ 30456-97. Изучение излома испытанного образца показало

присутствие расслоения в середине толщины проката по остаточной ликвационной неоднородности. На рис. 5 показан излом с расслоением в середине.



Рис. 5. Излом образца, испытанного на ударный изгиб падающим грузом

Fig. 5. Fracture of a DWTT sample

В литературе описан способ снижения осевой неоднородности в литой структуре в процессе нагрева перед горячей прокаткой. Автор работы [30] с целью формирования однородной мелкозернистой структуры непрерывнолитой заготовки и снижения его центральной сегрегационной неоднородности использует перерекристаллизованный отжиг литой заготовки. Режим перерекристаллизационного отжига сляба низколегированной стали заключался в нагреве до 930°C и выдержке 3,5 часа, охлаждение с печью до температуры 500°C . Однако полного устранения негативных факторов достичь не удалось, поскольку воздействие оказывалось на уже сформированную литую структуру.

Металлургическая наследственность оказывает влияние на структурообразование на протяжении всего технологического цикла не только в середине толщины проката. При анализе

термокинетических диаграмм распада аустенита в конструкционных сталях согласно [20] необходимо учитывать влияние исходной литой структуры заготовки на конечную структуру после термической обработки, даже в небольших по размерам образцах стали диаметром 4–6 мм, в которых скорость охлаждения в разных микрообъемах должна различаться незначительно, структура продуктов распада неоднородная, причинами этого различия могут быть химическая неоднородность в объеме «бывших» первичных дендритов. Микроликвация является следствием неравновесной кристаллизации сплавов в реальных условиях формирования непрерывнолитой заготовки и характеризует химическую неоднородность по сечению кристалла, зерна. Состав затвердевшего дендрита неоднородный, сердцевина является самой чистой, так как она затвердевает первая. Затвердевание приводит к возрастающему обогащению междендритного слоя. Концентрация растворённого вещества в дендрите увеличивается от сердцевины к его периферии и традиционно называется дендритной ликвацией либо микроликвацией [5]. Марганец, который, присутствует в качестве легирующего элемента, является склонным к ликвации и играет важную роль в химической сегрегации. В работе [13] использовали метод микрорентгеноспектрального анализа образцов, вырезанных из сляба, определяли содержание основных легирующих и примесных элементов в междендритном пространстве и в осях дендритов. Первичную сегрегацию элементов рассчитывали как отношение концентрации элемента в междендритном пространстве и в первичной оси дендрита.

С целью исследования распределения содержания марганца в осях и межосных промежутках дендритов в литой структуре низкоуглеродистой низколегированной стали был отобран образец от промышленного сляба доэвтектоидной стали с содержанием Mn 1,29%. Содержание Mn в осях дендритов и междендритном пространстве исследовали с помощью микрорентгеноспектрального анализа на электронном микроскопе. На **рис. 6** показана карта распределения содержания марганца. Наибольшее значение содержания марганца 3,0% наблюдается в межосных промежутках. В осях дендритов содержание Mn уменьшается до значения 0,9%.

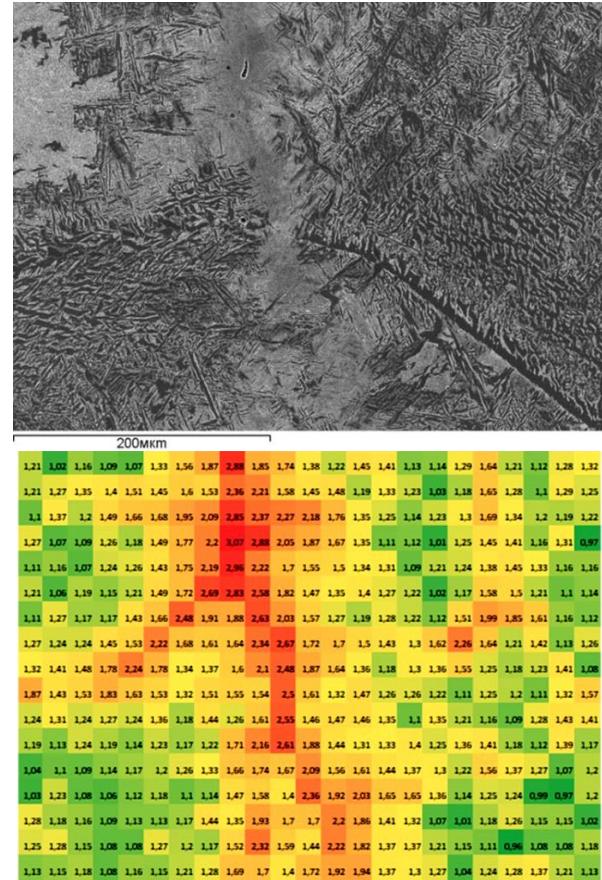


Рис. 6. Распределение содержания Mn в осях

и межосных промежутках дендритов

Fig. 6. Distribution of Mn content in the axes
and inter-axial spaces of dendrites

Как правило, наследуемая ликвация в горячекатаном прокате проявляется в формировании структурной неоднородности с областями повышенной твердости. Марганец принадлежит к легирующим элементам, расширяющим γ -область, в низкоуглеродистых сталях с содержанием марганца более 1,5% при охлаждении с температуры конца прокатки фазовые превращения смещаются в промежуточную область либо в мартенситную [25]. Особенности диффузионных процессов в марганцевых сталях таковы, что при определенных составах в структуре стали могут одновременно присутствовать перлит, структуры промежуточной области, мартенсит и аустенит [25]. Снижение температуры Ar3 в областях с высоким содержанием Mn по сравнению с областями с низким содержанием Mn приводит к возникновению сегрегации во время фазового превращения при охлаждении: феррит сначала зарождается в участках с высокой температурой Ar3, углерод выталкивается из почти чистого ферритного железа в аустенит, тем самым обогащая его [27].

С целью исследования совместного влияния микросегрегаций и температурно-деформационного воздействия на формирование конечной структуры изготовлены и исследованы металлографические шлифы по толщине горячекатаного проката. На **рис. 7** показана в продольном сечении проката структурная неоднородность, воспроизведенная по наследственному признаку. В структуре металла с основным содержанием Mn 1,3% присутствуют феррит, перлит и локальные участки бейнита, образованные в зонах, обогащенных марганцем до 2,88%. Выполнено измерение микротвёрдости характерных структурных составляющих. Колебания микротвёрдости по толщине проката составляют от 250 HV0,1 до 512 HV0,1.



Рис. 7. Вид микроструктуры по толщине горячекатаного проката с бейнитными участками, обогащёнными марганцем
Fig. 7. Type of microstructure along thickness of hot rolled products with bainitic areas, enriched with manganese

Исследования влияния структурного состояния литой заготовки на свойства горячекатаного листа низколегированной стали [30] показывают, что структурная неоднородность проката, обусловленная наследованием несовершенств литой структуры, приводит к слоистому характеру разрушения и неблагоприятно сказывается на механических свойствах. Наличие зон ликвационной неоднородности, имеющих повышенную твёрдость, низкие пластичность и сопротивление разрыву, послужило причиной возникновения расслоений при испытаниях падающим грузом и испытаниях по определению критического раскрытия в вершине трещины. Раскрытие слоёв в изломе образца происходит за счёт проскока хрупкой трещины в ликвационной прослойке [30]. Вид образцов со слоистым изломом, испы-

танных падающим грузом на ударный изгиб, приведён на **рис. 8**.



Рис. 8. Слоистый излом в образцах стали, испытанный на ударный изгиб падающим грузом
Fig. 8. Laminated fracture in DWTT samples

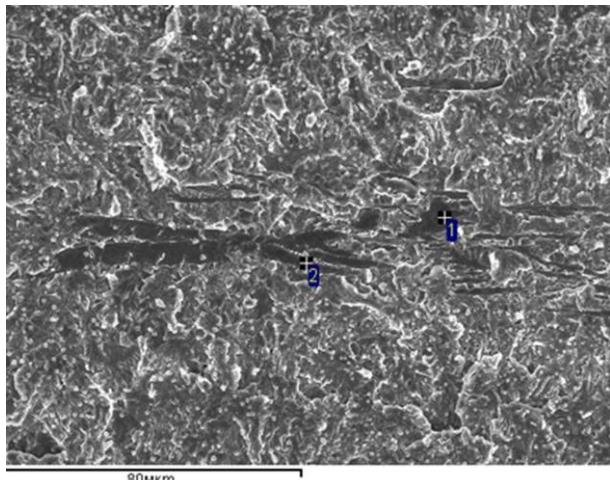
В некоторых исследованиях [11] отмечается, что ликвация проявляется не только в формировании структурной неоднородности повышенной твердости, но и в формировании микротрещин в осевой зоне. Исследования коррозионностойких сталей [12] показывают, что основной проблемой при испытании на стойкость к водородному растрескиванию (HIC) является сегрегационная неоднородность и образование коррозионных трещин в области осевой ликвации. С целью исследования влияния осевой химической неоднородности в прокатанной стали на водородное растрескивание (HIC) выполнили испытание в соответствии с требованиями стандарта NACE TM0284-2011. Образцы от горячекатаного проката выдерживали в растворе (5% NaCl + 0,5% CH₃COOH). Водородные трещины в испытанных образцах присутствовали в середине толщины проката по полосам химической неоднородности (**рис. 9**).



Рис. 9. Вид водородной трещины в осевой зоне по полосам химической неоднородности
Fig. 9. The hydrogen crack in the axial zone along the bands of chemical inhomogeneity

Известно, что марганец обладает повышенным сродством к сере, что приводит к образова-

нию сульфидов MnS в ликвационных полосах, провоцирующих снижение ударной вязкости на образцах, вырезанных в поперечном направлении относительно прокатки. В источнике [24] авторы пишут, что сульфидные включения MnS в деформированной структуре являются реперными точками, позволяющими однозначно идентифицировать междендритное пространство, образованное при «захлопывании» дендритной ячейки в конце затвердевания. Исследования с применением микрорентгеноспектрального анализа образцов НС от горячекатаного проката низкоуглеродистой стали подтвердили присутствие сульфидов марганца на поверхности водородной трещины. На **рис. 10** приведены результаты исследования неметаллических включений на поверхности коррозионной трещины, обнаруженной в осевой зоне по полосам химической неоднородности.



Спектр	S	Cr	Mn	Fe	Cu	Nb
1	14.11	0.99	19.10	65.80		
2	15.30	0.77	22.43	49.89	0.29	11.33

Рис. 10. Результаты микрорентгеноспектрального анализа включений на поверхности водородной трещины в осевой зоне по полосам химической неоднородности

Fig. 10. X-ray microanalysis of inclusions on the surface of a hydrogen crack in the axial zone by bands of chemical inhomogeneity

Одним из основных последствий микросегрегации примесей и легирующих элементов в стали является образование различных полосчатых структур при прокатке стали. Неоднородность, вызванная дендритной ликвацией, наследуется в полосчатой структуре листового проката и оказывает негативное влияние на работу разрушения прокатанной стали. В зависимости от скорости охлаждения проката чаще всего

встречаются типы структурных полос: ф/б, ф/м, п/б, п/м, б/м, где «ф» – феррит, «п» – перлит, «б» и «м» – соответственно относятся к бейниту и мартенситу. Большой объем исследований по полосчатым стальям в настоящее время дает неопровергимые доказательства того, что полосчатость в микроструктуре горячекатаного проката является результатом микросегрегации одного или нескольких легирующих элементов в стали.

В ходе деформации дендритные области с низкой концентрацией легирующих элементов, так же как и междендритные области с высокой концентрацией легирующих элементов, растягиваются в строчки параллельно направлению течения деформации. Исследования влияния полосчатости на механические свойства показали значительную анизотропию ударных свойств. Полосчатые стали неизменно содержат некоторую степень удлиненных включений, обычно сульфидов, в наследуемых прокатом из междендритных пространств, что может способствовать снижению поперечных ударных свойств [21, 23]. Также волокнистая структура может способствовать ухудшению прочности и вязкости в поперечном направлении плоскости проката [25]. На **рис. 11** продемонстрирована ферритно-перлитная полосчатость в структуре.

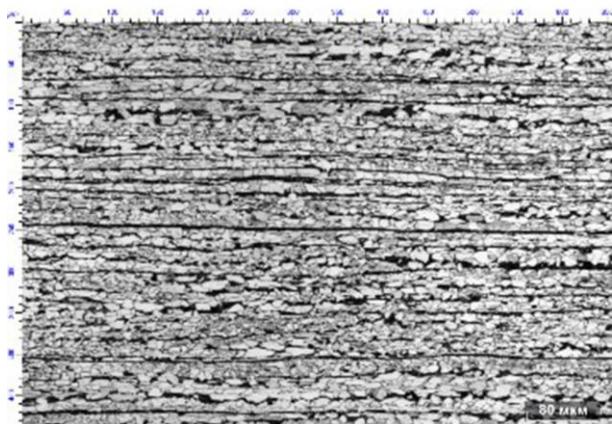


Рис. 11. Полосчатость в ферритно-перлитной стали
Fig. 11. Banding in ferrite-pearlite steel

В работе [28] исследованиями установлено, что наиболее приемлемым вариантом ликвидации нежелательной структурной неоднородности при металлопеределе являются технологии тепловой обработки стали (горячая пластическая деформация и предварительная термическая обработка) путем рационального сочетания температурно-временных и скоростных параметров процесса на стадии аустенизации, этапе охлаждения до $Ac1$ – (20–40)°С и стадии диффузионного γ - α превращения переохлажденного аустенита. Для исключения

негативного влияния центральной пористости и ликвационных полосок на показатели физико-механических свойств стали автор [28] рекомендует выполнять горячую пластическую деформацию сплава со степенью более 87,5% (коэффициент вытяжки при прокатке от 8 крат и более). В работе [29] устранение полосчатости в низкоуглеродистых сталях достигнуто в случаях охлаждения стали от температуры аустенизации до температуры минимальной устойчивости аустенита со скоростью более 23°C/мин.

Заключение

Обзор технической литературы и экспериментальные данные позволяют сделать заключение о значительном влиянии параметров макро- и микростроения литой стали на формирование микроструктуры и свойств при горячей прокатке стали. На примере исследований литой доэвтектоидной стали наблюдается сопоставимость коэффициентов сегрегации химических элементов с различной степенью выраженности осевой хи-

мической неоднородности в макроструктуре, выявленной травлением. С увеличением балла химической неоднородности наблюдается увеличение коэффициента сегрегации примесного элемента S. Изучено распределение содержания марганца в осах и межосных промежутках дендритов. Содержание марганца значительно увеличивается в межосных промежутках. При изучении макроструктуры горячекатаного проката выявлены осевые линии повышенной травимости, характеризующие остаточную осевую ликвационную неоднородность. На примере макроструктуры горячекатаного проката доэвтектоидной стали установлено присутствие локальных структур повышенной твёрдости по местам микросегрегаций и образование расслоений в ликвационных прослойках в образцах при испытаниях на ударный изгиб. Испытания на водородное растрескивание горячекатаного проката показали, что наследуемая в прокате осевая химическая неоднородность может являться одной из причин появления коррозионных трещин.

Список литературы

1. Чернов Д.К. Избранные труды по металлургии и металловедению / сост. канд. техн. наук А.С. Федоров; под ред. акад. В.Д. Садовского. М.: Наука, 1983. 447 с.
2. Фейлер С.В., Емельянова Е.Е. Непрерывная разливка стали: от идеи к промышленной реализации // История науки и техники и университетское образование: сб. материалов науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов УрФУ и МИСиС, 2010. С. 44–49. ISBN 978-5-87623-381-3
3. Емельянов К.И. Системный анализ неравновесной кристаллизации углеродистых и низколегированных сталей для прогнозирования их структурной и химической микронеоднородности: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2014. 178 с.
4. George Krauss. Solidification, Segregation, and Banding in Carbon and Alloy Steels. The 2003 Howe Memorial Lecture Published with permission of the Iron & Steel Society. Metallurgical and materials transactions. Vol. 34B, December 2003, pp.781–792.
5. A. Ghosh. Segregation in cast products. Department of Materials and Metallurgical Engineering. Sadhana, Indian Institute of Technology, Kanpur 208 016, India. Vol. 26, Parts 1 & 2, February–April 2001, pp. 5–24. e-mail: ahin@iitk.ac.in
6. Завалишин А.Н., Кожевников Е.В. Влияние технологии непрерывной разливки на структуру низколегированной стали на различных этапах производства // Металлург. 2017. Вып. 12. С. 13–18.
7. Центральная сегрегационная неоднородность в непрерывнолитых заготовках и толстолистовом прокате / А.П. Белый, О.Б. Исаев, Ю.И. Матросов, А.О. Носоченко. М.: Металлургиздат, 2005. 136 с.
8. Казаков А.А., Пахомова О.В., Казакова Е.И. Исследование литой структуры промышленного сляба ферритно-перлитной стали // Черные металлы. 2012. Вып.11. С. 9–14
9. Эфрон Л.И. Металловедение в «большой» металлургии. Трубные стали. М.: Металлургиздат, 2012. 696 с.
10. Структурная неоднородность и методы её снижения для повышения качества конструкционных сталей / Малахов Н.В., Мотовилина Г.Д., Хлусова Е.И., Казаков А.А. // Вопросы материаловедения. 2009. Вып. 3. С. 52–64.
11. Исследование дефектов горячекатаного листа из трубной стали и причин их образования / Шабурова Н.А., Киштыкова М.С., Гольдштейн В.Я., Рущиц С.В., Пластинин Б.Г. // Вестник ЮУрГУ. Сер. Металлургия. 2018. Т. 18. № 4. С. 82–86. DOI: 10.14529/met180409
12. Развитие технологий производства стали, проката и труб на Выксунской производственной площадке: сб. тр. / под общ. ред. А.М. Барыкова. М.: Металлургиздат, 2016. 480 с.
13. Методика оценки ликвационной полосы листового проката / Казаков А.А., Чигинцев Л.С., Казакова Е.И., Рябошук С.В., Марков С.И. // Чёрные металлы. 2009. Вып. 12. С.17–22.
14. Завалишин А.Н., Чикишев Д.Н., Кожевников Е.В. Методика оценки макроструктуры непрерывнолитых слябов трубных сталей категории прочности К60 и К65 // Сталь. 2020. Вып. 1. С. 8–11.

15. Мошкунов В.В., Столяров А.М., Казаков А.С. Снижение осевой химической неоднородности трубной стали в результате мягкого обжатия непрерывнолитого сляба // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. Вып. 2. С. 24–25.
16. Химическая неоднородность непрерывнолитого сляба из трубной особонизкосернистой стали / Крылова Е.А., Столяров А.М., Мошкунов В.В., Потапова М.В. // Теория и технология металлургического производства. 2017. №1. С. 20–22.
17. Разгулин И.А., Чикишев Д.Н., Завалищин А.Н. Исследование трансформации химической неоднородности (ликвации) в процессе толстолистовой прокатки микролегированных трубных сталей // Моделирование и развитие процессов ОМД. 2017. №23. С. 44–49.
18. Дендритная ликвация в сплавах железа в зависимости от массы добавочных элементов и их физических свойств / Кузьмин Ю.Д., Секачёв А.О., Качиков А.С., Терзи В.В. // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. 2014. Т. 57. № 9. С. 52–55.
19. Столяров А.М., Мошкунов В.В., Потапова М.В. Химическая неоднородность непрерывнолитых слябов разной толщины из трубной стали // Бюл. научно-технической и экономической информации «Чёрная металлургия». 2019. Т. 75. №10. 2019. С.1140–1145. DOI: 10.32339/0135-5910-2019-10
20. Анастасиади Г.П., Кондратьев С.Ю., Сильников М.В. Роль термокинетических диаграмм распада переохлаждённого аустенита при разработке конструкционных сталей // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2016. №2(243). С. 99–113. DOI: 10.5862/JEST.243.11
21. John D. Verhoeven. A Review of Microsegregation Induced Banding Phenomena in Steels (Submitted 11 November 1999; in revised form 22 February 2000) / Journal of Materials Engineering and Performance Vol. 9(3). June 2000, pp. 286–296.
22. Кудря А.В. Совместное влияние разномасштабных структур на колебание качества металлопродукции // Металловедение и термическая обработка металлов. 2005. №5. С. 18–23.
23. Разгулин И.А., Чикишев Д.Н. Моделирование процесса прокатки сляба с осевой химической неоднородностью // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2017. Т. 1. С. 68–71.
24. Казаков А.А., Пахомова О.В., Казакова Е.И. Исследование эволюции литой структуры при пластической обработке ферритно-перлитной стали // Черные металлы. 2013. №9. С. 15–20.
25. Гудремон Э. Специальные стали: пер. с нем. Изд. 2-е, сокращ. и перераб. /под ред. А.С. Займовского. М.: Металлургия, 1966. Т. 1. 737 с.
26. Флеминг М. Процессы затвердевания / пер. с англ. В.Н. Вигдоровича, В.Г. Глебовского, П.П. Поздеева, Б.М. Рубинчика, Е.З. Спектор; под ред. д-ра техн. наук А.А. Жукова, д-ра техн. наук В.В. Рабиновича. М.: Мир, 1977. 413 с.
27. George Krauss. Solidification, Segregation, and Banding in Carbon and Alloy Steels. Metallurgical and Materials Transactions B, volume 34B, December 2003, pp.781–792.
28. Швеёва Т.В. Повышение потребительских свойств стальных изделий нейтрализацией структурной наследственности при технологическом металлопеределе в машиностроении: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Набережные Челны, 2012. 23 с.
29. Астащенко В.И. Исследование наследственного влияния металлургических факторов на процессы структурообразования сталей при термической обработке тяжелонагруженных деталей автомобиля: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2007. 39 с.
30. Цветков Д.С. Повышение стабильности свойств и качества продукции стана 5000 ОАО «Северсталь» за счёт улучшения структуры толстолистового штрупса из высокопрочных низколегированных сталей: автореф. дис... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2012. 22 с.

References

1. Chernov D.K. *Izbrannye trudy po metallurgii i metallovedeniyu* [Selected studies on metallurgy and metal science]. Originated by Federov A.S., PhD (Eng.); edited by Sadovsky V.D., academician. Moscow: Nauka, 1983, 447 p. (In Russ.)
2. Feiler S.V., Emelyanova E.E. Continuous casting of steel: from idea to industrial production. *Istoriya nauki i tekhniki i universitetskoe obrazovanie: sbornik materialov nauchno-prakticheskoy konferentsii aspirantov, magistrantov i studentov UrFU i MISIS* [History of science and engineering and university education: proceedings of the scientific and practical conference of PhD students, master's students and students of UrFU and MISIS], 2010, pp. 44–49. ISBN 978-5-87623-381-3 (In Russ.)
3. Emelyanov K.I. *Sistemnyi analiz neravnovesnoy kristallizatsii uglerodistykh i nizkolegirovannykh stalei dlya prognozirovaniya ikh strukturnoy i khimicheskoy mikroneodnorodnosti: dis.* [A system analysis of non-equilibrium crystallization of carbon and low-alloyed steels to forecast their structural and chemical microinhomogeneity: PhD thesis]. Saint Petersburg, 2014. 178 p.
4. George Krauss. Solidification, segregation, and banding in carbon and alloy steels. The 2003 Howe Memorial Lecture Published with permission of the Iron & Steel Society. Metallurgical and materials transactions. VOLUME 34B, DECEMBER 2003, pp.781–792

5. Ghosh A. Segregation in cast products. Department of Materials and Metallurgical Engineering. Sadhana, Indian Institute of Technology, Kanpur 208 016, India. Vol. 26, Parts 1 & 2, February–April 2001, pp. 5–24. e-mail: ahin@iitk.ac.in
6. Zavalishchin A.N., Kozhevnikov E.V. Effect of a continuous casting technology on the structure of low-alloyed steel at different production stages. *Metallurg [Metallurgist]*, 2017, no. 12, pp.13–18. (In Russ.)
7. Belyi A.P., Isaev O.B., Matrosov Yu.I., Nosochenko A.O. *Tsentralnaya segregatsionnaya neodnorodnost v nepre-rvynolitykh zagotovkakh i tolstolistovom prokate* [Central segregation inhomogeneity in concast billets and heavy plates]. Moscow: Metallurgizdat, 2005, 136 p. (In Russ.)
8. Kazakov A.A., Pakhomova O.V., Kazakova E.I. Study on a cast structure of an industrial slab from ferrite-pearlite steel. *Chernye metally* [Ferrous Metals], 2012, no. 11, pp. 9–14. (In Russ.)
9. Efron L.I. Metal science in “large” metallurgy. Tube and pipe steels. Moscow: Metallurgizdat, 2012, 696 p. (In Russ.)
10. Malakhov N.V., Motovilina G.D., Khlusova E.I., Kazakov A.A. Structural inhomogeneity and methods of its reduction to improve the quality of structural steels. *Voprosy materialovedeniya* [Materials Science Issues], 2009, no. 3, pp. 52–64. (In Russ.)
11. Shaburova N.A., Kishtykova M.S., Goldshtein V.Ya., Rushchits S.V., Plastinin B.G. Study on defects of hot rolled plates from pipe steels and reasons for their formation. *Vestnik YuUrGU. Ser. Metallurgiya* [Bulletin of SUSU. Metallurgy Series], 2018, vol. 18, no. 4, pp. 82–86. doi: 10.14529/met180409
12. Barykov A.M. (ed.) Development of steelmaking technologies, manufacturing processes for rolled products and pipes on the Vyksa industrial site. Proceedings. Moscow: Metallurgizdat, 2016, 480 p. (In Russ.)
13. Kazakov A.A., Chigintsev L.S., Kazakova E.I., Ryaboshuk S.V., Markov S.I. A procedure used to evaluate segregation streaks on flat products. *Chernye metally* [Ferrous Metals], 2009, no. 12, pp. 17–22. (In Russ.)
14. Zavalishchin A.N., Chikishev D.N., Kozhevnikov E.V. Methods of evaluation of the concast steel slab macrostructure of pipe steel grades in the strength category K60 and K65. *Stal [Steel]*, 2020, no. 1, pp. 8–11. (In Russ.)
15. Moshkunov V.V., Stolyarov A.M., Kazakov A.S. Reduction of axial chemical inhomogeneity of pipe steel as a result of soft reduction of concast slabs. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2012, no. 2, pp. 24–25. (In Russ.)
16. Krylova E.A., Stolyarov A.M., Moshkunov V.V., Potapova M.V. Chemical inhomogeneity of concast slabs from pipe ultra-low sulfur steels. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [Theory and Technology of Metallurgical Production], 2017, no. 1, pp. 20–22. (In Russ.)
17. Razgulin I.A., Chikishev D.N., Zavalishchin A.N. Study on the transformation of chemical inhomogeneity (liquation) during heavy plate rolling of micro-alloyed pipe steels. *Modelirovaniye i razvitiye protsessov OMD* [Simulation and development of metal forming processes], 2017, no. 23, pp. 44–49. (In Russ.)
18. Kuzmin Yu.D., Sekachev A.O., Kachikov A.S., Terzi V.V. Dendritic liquation in iron alloys as a function of the mass and physical properties of the secondary elements. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy], 2014, vol. 57, no. 9, pp. 52–55. (In Russ.)
19. Stolyarov A.M., Moshkunov V.V., Potapova M.V. Chemical inhomogeneity of concast slabs of various thickness from pipe steels. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tehnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economical Information], 2019, vol. 75, no. 10, 2019, pp. 1140–1145. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2019-10-1140-1144>
20. Anastasiadi G.P., Kondratiev S.Yu., Silnikov M.V. Role of CCT diagrams of the decay of supercooled austenite, when developing structural steels. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta* [St. Petersburg State Polytechnic University Journal. Science and Engineering], 2016, no. 2(243), pp. 99–113. DOI: 10.5862/JEST.243.11
21. John D. Verhoeven. A review of microsegregation induced banding phenomena in steels. *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 9(3), June 2000, pp. 286–296.
22. Kudrya A.V. Joint effect of structures of various scales on variations in the quality of steel products. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment of Metals], 2005, no. 5, pp. 18–23. (In Russ.)
23. Razgulin I.A., Chikishev D.N. Simulation of a rolling process of slabs with axial chemical inhomogeneity. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya* [Current Issues of Modern Science, Engineering and Education], 2017, vol. 1, pp. 68–71. (In Russ.)
24. Kazakov A.A., Pakhomova O.V., Kazakova E.I. Study on the evolution of a cast structure during plastic working of ferrite-pearlite steel. *Chernye metally* [Ferrous Metals], 2013, no. 9, pp. 15–20. (In Russ.)
25. Gudremont E. *Spetsialnye stali* [Special steels]. Translated from German, 2nd edition, abridged and revised; edited by Zaimovsky A.S. Moscow: Metallurgy, 1966, vol. 1, 737 p. (In Russ.)
26. Flemmings M. *Protessy zatverdevaniya* [Hardening processes]. Translated from English by Vigdorovich V.N., Glebovsky V.G., Pozdeev P.P., Rubinchik B.M., Spektor E.Z.; edited by Zhukov A.A., DrSc (Eng.), Rabinovich V.V., DrSc (Eng.). Moscow: Mir, 1977, 413 p. (In Russ.)
27. George Krauss. Solidification, segregation, and banding in carbon and alloy Steels. *Metallurgical and Materials Transactions B*, volume 34B, December 2003, pp. 781–792.
28. Shveeva T.V. *Povyshenie potrebitelskikh svoistv stalnykh izdelii neutralizatsiei strukturnoy nasledstvennosti pri tekhnologicheskem metalloperedele v mashinostroenii: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk* [Increasing consumer properties of steel parts by neutralizing structural heredity on a process stage in mechanical engineering: extended abstract of the PhD (Eng.) thesis]. Naberezhnye Chelny, 2012, 23 p.
29. Astashchenko V.I. *Issledovanie nasledstvennogo vliyaniya metallurgicheskikh faktorov na protessy strukturoobrazovaniya stalei pri termicheskoy obrabotke tyazhelonagruzhennykh detalei avtomobiliya: avtoreferat dissertatsii na*

- soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk* [Study on the inherited effect of metallurgical factors on forming structures of steels during heat treatment of heavy duty automobile parts: extended abstract of the PhD (Eng.) thesis]. Izhevsk, 2007, 39 p.
30. Tsvetkov D.S. *Povyshenie stabilnosti svoistv i kachestva produktsii stana 5000 OAO «Severstal» za schet uluchsheniya struktury tolstolistovogo shtripsa iz vysokoprochnykh nizkolegirovannykh stalei: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk* [Increasing stability of properties and quality of products of mill 5000 at OJSC Severstal by improving the structure of skelps from high-strength low-alloyed steels: extended abstract of the PhD (Eng.) thesis]. Saint Petersburg, 2012, 22 p.

Поступила 03.02.2021; принята к публикации 19.02.2021; опубликована 25.03.2021
Submitted 03/02/2021; revised 19/02/2021; published 25/03/2021

Хлыбов Александр Анатольевич – профессор, доктор технических наук,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: hlybov_52@mail.ru. ORCID 0000-0002-6559-7819

Ворожева Евгения Львовна – аспирант,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: vorozheva_el@vsw.ru. ORCID 0000-0003-1728-7776

Aleksandr A. Khlybov – DrSc (Eng.), Professor,
Alekseev Nizny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia
Email: hlybov_52@mail.ru. ORCID 0000-0002-6559-7819

Evgeniya L. Vorozheva – PhD student,
Alekseev Nizny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia
Email: vorozheva_el@vsw.ru. ORCID 0000-0003-1728-7776