

А.И.Бабаченко, Е.Г.Дёмина, А.В.Кныш, Е.А.Шпак

Институт черной металлургии НАН Украины им.З.И.Некрасова

**ОСОБЕННОСТИ МАКРО- И МИКРОСТРУКТУРЫ СТУПИЦЫ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЁС Ø 957 ММ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ
НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ**

Целью работы является изучение природы участков повышенной травимости в структуре ступиц железнодорожных колёс и определение их влияния на усталостную прочность колёс, изготовленных из непрерывнолитых заготовок. Участки повышенной травимости считались дефектом производства – «ликвационная полоса, выходящая на поверхность ступицы колёс». Установлено, что этим предполагаемым дефектом макроструктуры является естественная составляющая микро-структуры углеродистой стали, которая образуется в результате дендритной ликвации марганца и кремния при затвердевании литой заготовки. Показано, что такая ликвация не является дефектом металлургического производства.

Ключевые слова: железнодорожные колёса, непрерывнолитая сталь, макро- и микроструктура, ликвация

Современное состояние вопроса. Коренное изменение технологии производства железнодорожных колёс, заключающееся в изменении способа производства стали, замене слитка непрерывнолитой заготовкой (НЛЗ), в изменении размера колёсной заготовки, вызвало проявление определённых особенностей в их макроструктуре. При анализе темплетов ступиц в макроструктуре наблюдаются участки повышенной травимости в виде полос, имеющих достаточную протяжённость и во многих случаях выходящих в сечение диска и на поверхность ступицы (рис. 1). Часто подобные особенности макроструктуры служат причиной бракования колёс.

Согласно методическим указаниям (МУ У 35.2 – 23365425 – 045:2011 «Колёса цельнокатаные. Требования к качеству стали по неметаллическим включениям и макроструктуре. Метод контроля») участки повышенной травимости – это ликвационные полосы, которые являются дефектом в виде нитевидных потемнений (на серном отпечатке) или нитевидных участков повышенной травимости (на макротемплетах). Они представляют собой следы полностью или частично залеченных (заварившихся) маточным раствором надрывов, образовавшихся в процессе затвердевания. В случае если такая ликвационная полоса сильно выражена и (или) выходит на поверхности ступицы или в сечение диска колеса, то она является недопустимым дефектом макроструктуры (рис. 1).

Кроме классификации и описания данная нормативно-техническая документация не поясняет причины образования и не содержит методических рекомендаций, на основании которых участок повышенной травимости можно однозначно идентифицировать как металлургический дефект – ликвационная полоса.

а

б

Рис. 1. Сильно выраженные ликвационные полосы в макроструктуре ступицы железнодорожного колеса: а – ликвационная полоса, выходящая в сечение диска, б – ликвационные полосы, выходящие на поверхность ступицы.

Известно, что появление ликвационных полос в макроструктуре стали связано с осевой, внеосевой и пятнистой ликвацией в литой заготовке. На основании исследований [1-3] можно выделить общие характерные признаки ликвационной полосы. Эти участки имеют большую химическую неоднородность, загрязнены примесями (оксидами, нитридами, сульфидами, силицидами и др.), которые при скоплении образуют протяженный, твёрдый и хрупкий металлургический дефект, отличаются по значениям механических свойств от основного металла и в процессе эксплуатации под действием внешних нагрузок могут служить концентраторами напряжений. Наличие и выход ликвационной полосы на поверхность изделия опасен расслоением металла, особенно, если при эксплуатации он подвергается динамическим нагрузкам, и возможными катастрофическими последствиями. По этим причинам присутствие ликвационной полосы (сильно выраженной) и её выход на поверхность ступицы железнодорожного колеса считают браковочным признаком.

С другой стороны, наблюдаемые в макроструктуре колёс, ликвационные полосы могут быть следствием дендритной ликвации. «Бывшие» междендритные участки литой структуры не являются браковочным признаком, так как возникают в результате естественного процесса кристаллизации стали. После горячей пластической деформации колёсной заготовки элементы дендритной структуры, особенно междендритные пространства, приближаются друг к другу настолько, что при визуальном анализе темплета их можно принять за единый структурный элемент, размеры которого сопоставимы с макроструктурой.

Целью работы является изучение природы участков повышенной травимости в структуре ступиц и определении их влияния на усталостную прочность железнодорожных колёс, изготовленных из непрерывнолитых заготовок.

Материал и методика исследований. Материалом для исследований макро- и микроструктуры являлись темплеты ступиц железнодорожных колёс Ø 957 мм из стали марки 2 (ГОСТ 10791 – 2011 «Колёса цельнокатаные») с «удовлетворительной» и «неудовлетворительной» согласно МУ У 35.2–23365425 – 045: 2011 макроструктурой (табл. 1). Колесо с неудовлетворительной макроструктурой забраковано по наличию «ликвационной полосы, выходящей на поверхность ступицы». В сравнительном

темплете ступицы колеса с удовлетворительной макроструктурой «ликвационные полосы» не выходят на её поверхность.

Для выявления дефектов, нарушающих сплошность металла (трещин, пор, раковин), проводили глубокое травление отшлифованного образца водным раствором соляной кислоты в соответствии с требованиями ГОСТ 10243–75. Для выявления в стали ликвации серы применяли метод Баумана. Ликвацию фосфора в стали выявляли травлением отшлифованного темплета в реактиве состава: 85 г хлорной меди, 53 г хлористого аммония в 1000 см³ воды [4].

Металлографический анализ выполнен на световых микроскопах «Neophot 32» и «Axiovert 200 M MAT» производства фирмы «Carl Zeiss», количественный анализ выполнен в программе «AxioVision 4.6.3». Образцы для металлографического анализа вырезали в центральных и поверхностных (по месту предполагаемого дефекта) слоях ступиц колёс.

Таблица 1. Химический состав исследуемых ступиц колёс

Маркировка	Содержание элементов, % масс.							
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
«неуд»	0,58	0,72	0,31	0,010	0,002	0,07	0,10	0,15
«уд»	0,59	0,70	0,38	0,011	0,003	0,08	0,09	0,16

Оценка загрязнённости металла ступиц исследуемых колёс выполнена в соответствие с ГОСТ 1778 «Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений». Микроструктуру образцов ступицы железнодорожного колеса выявляли с помощью травления шлифов в 4 %-ном спиртовом растворе азотной кислоты. Распределение основных химических элементов (кремния и марганца) определено металлографическим методом с помощью травления в горячем растворе пикрата натрия [5].

Измерения микротвёрдости выполнены на ПМТ-3 при нагрузке на индентор 20 Г по ГОСТ 9450 «Измерение микротвёрдости вдавливанием алмазных наконечников».

Результаты исследований. Макроскопический анализ темплетов ступиц показал отсутствие дефектов, нарушающие сплошность металла. По месту предполагаемого дефекта макроструктуры – «ликвационной полосы, выходящей на поверхность ступицы» – наблюдаются участки повышенной травимости в виде тонких линий, появление которых, скорее всего, связано с растровами междуветвий дендритной структуры (рис. 2, а). В результате прямой дендритной ликвации остаточная жидкость, заполняющая междендритное пространство, обогащается примесными элементами. Это обуславливает повышенную травимость металла этих микрообъёмов по сравнению с металлом дендритов.

б

Рис. 2. Макроструктура темплетов ступиц исследуемых колёс после травления в 50-% растворе соляной кислоты: а – с маркировкой «неуд», б – с маркировкой «уд».

Несмотря на практически одинаковый химический состав (табл. 1), диаметр исходной заготовки (\varnothing 450 мм), а также параметры выплавки и разливки, макроструктура темплетов ступицы колёс имеет различный рисунок. Макроструктура колеса «неуд» в поверхностных слоях ступицы характеризуется более крупным строением деформированной дендритной структуры (рис. 2, а), микроскопический размер которой при первичном (в условиях предприятия) анализе позволил классифицировать данную особенность структуры как металлургический дефект – ликвационная полоса.

Макроструктура колеса «уд» в поверхностных слоях ступицы – это мелкие деформированные дендриты и, особенно, междендритные пространства (рис. 2, б), протяжённость которых недостаточна, чтобы их можно было классифицировать как ликвационные полосы. Наблюдаемые при визуальном анализе ликвационные участки являются сегрегациями легирующих и примесных элементов, образовавшимися на стадии затвердевания исходной непрерывнолитой заготовки.

Различие в макростроении анализируемых темплетов ступиц колёс \varnothing 957 мм, по всей видимости, может быть связано с режимами электромагнитного перемешивания (ЭМП), используемыми в процессе непрерывной разливки. Мелкое и однородное дендритное строение в ступице колеса «уд» свидетельствует о лучшем внешнем динамическом воздействии на центральную часть исходной заготовки на стадии затвердевания. Как было отмечено выше «ликвационная полоса» – это дефект металлургического происхождения, который характеризуется повышенным содержанием углерода, серы, фосфора и др. элементов.

В работе определено как распределены серя и фосфор в макроструктуре ступиц исследуемых колёс. На серных отпечатках анализируемых темплетов показано качественное распределение серы (рис.3). Поскольку тёмные точки, места обогащённые серой, расположены равномерно, следовательно, в макроструктуре ступиц колёс сера также распределена равномерно.

Распределение фосфора в макроструктуре ступиц исследуемых колёс показано на рис. 4. Более тёмные, т. е. глубоко протравленные участки – это места, обогащённые фосфором, светлые участки – это места с меньшим содержанием фосфора [4]. Анализ показал, что фосфор распределён в структуре колёс равномерно. Однако, участки с повышенным его содержанием в макроструктуре колеса «неуд» более крупные, чем в макро-

структуре колеса «уд». Это подтверждает, что исходные НЛЗ подвергались внешнему динамическому воздействию по разным режимам.

Таким образом, структура исследуемых ступиц колёс не содержит дефектов макроскопического строения, нарушающих сплошность металла. Сера и фосфор распределены в макроструктуре ступиц колёс равномерно.

а

б

Рис. 3. Распределение серы в макроструктуре ступиц исследуемых колёс: а – с маркировкой «неуд», б – с маркировкой «уд».

а

б

Рис. 4. Распределение фосфора в макроструктуре ступиц исследуемых колёс: а – с маркировкой «неуд», б – с маркировкой «уд».

На рис.5 показаны неметаллические включения, наблюдаемые в центральных и поверхностных слоях ступиц исследуемых колёс. Металлографическим методом определено, что, в основном, это сульфиды, силикаты глобулярной формы, нитриды титана и комплексные неметаллические включения (например, оксисульфиды и т. п.). Несмотря на то, что металл ступицы – это бывшие центральные, наиболее загрязнённые слои НЛЗ, содержание неметаллических включений не превышает 2 балл и соответствует требованиям ГОСТ 10791 – 2011, предъявляемым к ободьям колёс. Однако в центральных слоях ступицы с неудовлетворительной макроструктурой сульфидные включения имеют более вытянутую форму по сравнению с аналогичными включениями сравнительном образце. Это ещё раз указывает на различие режимов ЭМП.

Центральные слои



а

б

Поверхностные слои



Рис. 5. Неметаллические включения в ступицах исследуемых колёс:
а, в – с маркировкой «неуд», б, г – с маркировкой «уд».

В ступице колеса «неуд», в месте предполагаемого дефекта – в ликвационной полосе, выходящей на поверхность, – присутствует только единичное комплексное включение, которое по внешнему виду и при сравнении со справочными данными классифицировано как сульфид марганца с нитридом титана 0,5 балла [6].

Таким образом, по загрязнённости неметаллическими включениями наблюдаемая «ликвационная полоса, выходящая на поверхность ступица колеса» не является дефектом металлургического происхождения.

На рис.6,а показано, что микроструктура исследуемых образцов имеет неоднородное строение – сильно- и слаботравящиеся полосы (участки), состоящие из перлита и доэвтектоидного феррита. Наблюдение такого рельефа под микроскопом обусловлено растравленной шероховатой поверхностью. Шероховатость полированной поверхности микрошлифов появляется вследствие того, что составляющие микроструктуры имеют разную твёрдость – более мягкие части, стираясь легче, образуют углубления и представляются более тёмными, более же твёрдые остаются в виде выступов более светлыми [7, 8].

а

б

в

Рис. 6. Микроструктура в ступицах исследуемых колёс.

Средний размер действительного зерна (перлита) для микроструктуры ступиц обоих колёс составляет в светлотравящийся полосе порядка 60 мкм и в тёмнотравящийся полосе – 35 мкм (рис 6). Кроме этого, зная соотношения феррита и перлита, можно качественно охарактеризовать распределение углерода между данными участками.

Металлографический анализ показал, что в более светлых полосах наблюдается повышенное содержание перлита (твёрдой структурной составляющей), а в более тёмных – мягкой фазы – феррита (табл. 2).

Таблица 2. Результаты металлографического анализа микроструктуры ступиц исследуемых колёс

Маркировка колеса	Светлотравящиеся полосы			Тёмнотравящиеся полосы		
	Объемная доля, %		Номер зерна, G*	Объемная доля, %		Номер зерна, G*
	феррит	перлит		феррит	перлит	
«неуд»	3,3	96,7	4,76	20,6	79,4	6,22
«уд»	4,1	95,9	5,15	17,8	82,2	6,50

Примечание: номер действительного зерна определен в соответствии с ГОСТ 5639.

Поскольку условия охлаждения ступицы железнодорожного колеса при окончательной термической обработке могут быть приравнены к равновесным, то для определения приблизительного содержания углерода в данных полосах воспользовались правилом рычага [9]. Определено, что содержание углерода в микроструктуре колеса «неуд» составило 0,64 % в темнотравящихся полосах и 0,77 % в светлотравящихся, в микроструктуре колеса «уд» – 0,66 % и 0,77 % соответственно. То есть в более тёмных полосах содержание углерода практически соответствует марочному составу для стали марки 2 (ГОСТ 10791 – 2011), а в более светлых – стали близкой к эвтектоидному составу. В данных микрообъёмах стали, практически, всегда наблюдаются неметаллические включения (пластичные сульфиды, силикаты глобулярные, сложные комплексные включения и т. д.) как одиночные, так и их скопления (рис. 6, б, в). Кроме этого, детальный микроанализ ликвационных участков показал отсутствие микроскопических дефектов, нарушающих сплошность металла, – пор, трещин и т. п.

При исследовании места предполагаемого дефекта микроструктуры ступицы колеса «неуд» определено, что «ликвационная полоса, выходящая на поверхность» представляет собой светлотравящийся участок с повышенным количеством перлита, и, следовательно, углерода, аналогичный представленному на рис. 6. Причинами возникновения такой структурной неоднородности являются естественные ликвационные процессы, происходящие в стали при кристаллизации.

В работе определено распределение марганца и кремния в микроструктуре ступиц анализируемых колёс. Микроструктура исследуемых образцов после травления в пикрате натрия показана на рис. 7. Характерным является то, что после травления в данном реактиве ликвационные полосы (участки), которые при травлении ниталем были светлыми, приобрели тёмный цвет.

Ликвационные участки, образовавшиеся в процессе кристаллизации стали, не устраняются последующим нагревом заготовок под горячую

деформацию и термическую обработку и в микроструктуре готовых колёс представляют собой волокна, показывающие течение металла при деформации (формовке, штамповке и прокатке) [10]. Согласно данным работы [11] в ликвационных микрообъёмах углеродистой стали (0,42 – 0,50 % С) содержание кремния и марганца на 50 % выше, чем в микрообъёмах без видимой ликвации.

а б

в г

Рис.7. Распределение кремния и марганца в микроструктуре ступиц исследуемых колёс: а, б – с маркировкой «неуд», в, г – с маркировкой «уд».

Исследования, выполненные ИЧМ НАНУ для колёсной стали марки 2 (0,55 – 0,63 % С), показали ту же закономерность. В данных микрообъёмах повышенное содержание марганца способствует понижению коэффициента термодинамической активности углерода, и увеличению его концентрации [12]. В связи с повышенным содержанием углерода для светлых участков характерна более высокая концентрация γ -стабилизирующих элементов (например, марганца). Распад переохлаждённого аустенита в данных микрообъёмах происходит при более низкой температуре, и в итоге дисперсность перлита возрастает.

Результаты измерений микротвёрдости перлита в ликвационных полосах и в полосах без видимой ликвации приведены в табл. 3. Определено, что в микрообъёмах, обогащённых углеродом, марганцем и кремнием уровень микротвёрдости повышается на 20 %. Это характерно для образцов ступиц обоих колёс. Измерение микротвёрдости по сечению анализируемых ступиц показало, что по направлению от центра к поверхности ступицы микротвёрдость возрастает, т. к. поверхность ступицы соответствует осевой зоне НЛЗ с химической неоднородностью. Для микроструктуры образцов колеса «неуд» разница составляет 540 Н/мм², в образцах колеса «уд» – 350 Н/мм². Этот факт является косвенным доказательством того, что на стадии затвердевания более интенсивному внешнему динамическому воздействию подвергалась НЛЗ, используемая для изготовления колеса «уд».

Таблица 3. Микротвёрдость перлита в микроструктуре ступиц исследуемых колёс, Н/мм²

Маркировка колеса	Поверхность		Центр	
	ликвационная полоса	полоса без видимой ликвации	ликвационная полоса	полоса без видимой ликвации
«неуд»	3240	3080	3020	2700

«уд»	3720	3500	3820	3470
------	------	------	------	------

Анализ микроструктуры образца ступицы с предполагаемым дефектом «ликвационной полосой», в месте её выхода на поверхность после травления пикратом натрия показал, что она имеет тёмно-синюю окраску (рис.7,а). Это качественно подтверждает повышенное содержание кремния и марганца [5]. Исследуемая полоса содержит незначительное количество неметаллических включений. Причём их количество в месте предполагаемого дефекта даже меньше, чем в других ликвационных полосах, наблюдаемых в микроструктуре исследуемых образцов (рис.7,б,в). Рассматриваемая «ликвационная полоса» не отличается от подобных ликвационных участков, которые образуются в микроструктуре стали в результате дендритной ликвации кремния и марганца при кристаллизации.

Таким образом, по перечисленным особенностям исследуемая «ликвационная полоса» может быть охарактеризована как естественная структурная составляющая углеродистой стали, которая отличается повышенным содержанием углерода, марганца и кремния и не является дефектом металлургического происхождения.

Выводы.

Показано, что макроструктура ступиц исследуемых колёс с предполагаемым дефектом «ликвационная полоса» (участок повышенной травимости) не содержит дефектов строения, нарушающих сплошность металла. Сера и фосфор распределены в их макроструктуре равномерно. Содержание неметаллических включений в ступицах колёс, как с «удовлетворительной», так и с «неудовлетворительной» макроструктурой не превышает требований ГОСТ 10791 – 2011, предъявляемых к ободьям колёс (для ступицы они отсутствуют).

Установлено, что «ликвационные полосы», наблюдаемые в макро- и микроструктуре ступиц исследованных колёс, являются естественной составляющей микроструктуры углеродистой стали, образующейся в результате дендритной ликвации марганца и кремния при кристаллизации литой заготовки и не могут быть классифицированы как дефекты металлургического производства.

В спорных случаях при идентификации дефектов железнодорожных колёс и для исключения их необоснованного брака по предполагаемому дефекту макроструктуры (участку повышенной травимости) рекомендуется проводить дополнительные исследования микроструктуры с целью выявления характерных признаков ликвационной полосы в соответствии с требованиями МУ У 35.2 – 23365425 – 045:2011.

1. Худяков М.А., Муфтахов М.Х. К вопросу о расслоении металла труб. // Мировое сообщество и пути решения: Сб. науч. статей. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2004. – № 16. – С. 36 - 39.

2. *Методика* оценки ликвационной полосы листового проката. / А.А.Казаков, Л.С. Чигинцев, Е.И. Казакова, С.В. Рябошук, С.И.Марков // Чёрные металлы – 2009 – №12 – С. 18 - 22.
3. *Шibaков В.Г., Швейва Т.В., Астащенко В.И.* Технологическое обеспечение качества деформируемых стальных изделий. // Прогресивні технології і системи машинобудування. – 2011. – Вип. 42 – С. 294 - 301.
4. *Самохоцкий А.И., Куняевский М.Н.* Лабораторные по металлвоведению. – М.: «Машиностроение», 1971. – 184 с.
5. *Металлографические реактивы* / Справ. под. ред. В. С. Коваленко. – М.: Металлургия, 1981. – 102 с.
6. *Червяков А.Н.* Металлографическое определение включений в стали. – М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по цветной и чёрной металлургии, 1953. – 116 с.
7. *Металловедение* и термическая обработка / Справ. изд. в 3-х т. под ред. М. Л. Бернштейна, А. Г. Рахштадта. – Том 1. Методы испытаний и исследования. – М.: Металлургия, 1991. – 304 с.
8. *Микроструктура* стали. Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона [Электронный ресурс]. Викитека. Режим доступа: http://ru.wikisource.org/wiki/ЭСБЕ/Микроструктура_стали.
9. *Бунин К.П., Мовчан В.И., Шаповалов В.И.* Металлография железоуглеродистых сплавов. – Днепропетровск: (ДМетИ), 1974. – 160 с.
10. *Голиков И.Н.* Дендритная ликвация в стали. – М.: Металлургия, 1953. – 206 с.
11. *Трансформация* дендритной структуры на всех этапах производства железнодорожных осей. / Г.В.Левченко, С. В.Ершов, Е. Г. Дёмина и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2008. – № 2. – С. 74 – 76.
12. *Жуков А.А.* Термодинамические аспекты оптимизации состава комплекснолегированных сталей // Основы литейных сплавов: труды XIV совещания по теории литейных процессов. – Москва: Наука. – 1970. – С. 82 – 85.
13. *Вадзинский Р.* Статистические вычисления в среде Excel. – СПб.: Питер, 2008. – 608 с.

*Статья рекомендована к печати
докт.техн.наук, проф. И.Г.Узловым*

О.І.Бабаченко , К.Г.Дьоміна , А.В.Книш , Е.А.Шпак

Особливості макро- і мікроструктури ступиці залізничних колес ø 957 мм, що виготовлені з безперервнолитої заготовки

Метою роботи є вивчення природи ділянок підвищеного травлення в структурі ступиці залізничних коліс та визначення їх впливу на втомну міцність коліс, виготовлених з безперервнолитих заготовок. Ділянки підвищеного травлення вважалися дефектом виробництва - «ліквацийна смуга, що виходить на поверхню ступиці колеса». Встановлено, що причиною припущення щодо дефектоу макроструктури є природна складова мікроструктури вуглецевої сталі, що утворюється в результаті дендритної ликвації марганцю і кремнію під час охолодження литої заготовки. Показано, що така ліквация не є дефектом металургійного виробництва.