

И.Г.Узлов, А.И.Бабаченко, Ж.А.Дементьева, А.А.Кононенко,
А.Л.Сафронов

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ МИКРОСТРУКТУРЫ КОЛЕСНОЙ СТАЛИ НА ЕЕ ВЯЗКИЕ СВОЙСТВА

Основными структурными показателями, оказывающими определяющее влияние на уровень вязких характеристик, являются размер зерна и дисперсность перлита. Установлено, что для колесных сталей (номер зерна не ниже шестого) эффективность влияния величины зерна на ударную вязкость в несколько раз выше. Установлено положительное влияние уменьшения размера зерна и повышения дисперсности перлита на вязкость разрушения K_{1C} .

Введение. Железнодорожные колеса являются наиболее ответственным элементом подвижного состава железнодорожного транспорта. В процессе эксплуатации они подвергаются воздействию различных механических и термических нагрузок. Анализ причин выхода колес из эксплуатации свидетельствует о том, что во многих случаях это происходит из-за возникновения трещин или других дефектов в ободе колеса. Колеса относятся к изделиям, в которых в процессе эксплуатации невозможно избежать различных дефектов на поверхности катания. При неблагоприятном распределении остаточных напряжений и неудовлетворительной вязкости металла обода от этих дефектов в радиальном направлении могут развиваться усталостные трещины, что и приводит к разрушению колеса.

Ужесточение условий эксплуатации железнодорожных колес, (повышение нагрузки на ось, увеличение скорости движения железнодорожного транспорта и др.), а также использование в эксплуатации колес повышенной прочности и износостойкости поставило на повестку дня вопрос о необходимости более жесткого контроля вязких характеристик обода. Это, в первую очередь, определение ударной вязкости (работы удара) обода как при комнатной, так и при пониженных температурах. Наряду с традиционно используемыми характеристиками механических свойств в настоящее время для оценки надежности железнодорожных колес все более широко применяются критерии механики разрушения, среди которых особое место занимает критический коэффициент интенсивности напряжения K_{1C} . Знание этого параметра позволяет оценить сопротивляемость материала хрупкому разрушению. Ранее проведенные исследования показали [1, 2], что вязкость разрушения K_{1C} является структурно чувствительной характеристикой, а ее величина может изменяться в широких пределах в зависимости от структурного состояния колесной стали. Однако, исследование влияния параметров структуры на вязкость разрушения конструкционных сталей проводилось, в основном, на специальных легированных сталях (в первую очередь на хромистых и хромоникелиевых) [3,

4]. Для сталей массового производства (к которым в первую очередь относятся углеродистые стали) такие исследования практически отсутствуют.

В связи с этим, целью данной работы было исследование закономерностей и эффективности влияния параметров структуры углеродистых сталей, применяемых для производства железнодорожных колес, на такие их характеристики сопротивления хрупкому разрушению как вязкость разрушения и ударная вязкость.

Материал и методика исследования. Материалом для исследований служили колесная сталь марки 1 по ГОСТ 10791–2004: 0,48% С, 0,81% Mn, 0,40% Si, 0,011%P, 0,03 S (масс.), марки 2 по ГОСТ 10791–2004: 0,57% С, 0,66% Mn, 0,30% Si, 0,010% P, 0,009% S (масс.) и углеродистые стали различного состава: сталь 45 (0,48% С, 0,74% Mn, 0,34% Si, 0,011% P, 0,09% S масс.), сталь 55 (0,57% С, 0,73% Mn, 0,33% Si, 0,014% P, 0,011% S масс.), сталь 65 (0,64% С, 0,74% Mn, 0,31% Si, 0,019% P, 0,022% S масс.).

Механические испытания на статическое растяжение проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 1497–73. Для определения ударной вязкости применялись призматические образцы размерами 10×10×55 мм с U–образным надрезом глубиной 2 мм по ДСТУ ГОСТ 10791–2006. Отбор проб и изготовление образцов из обода колеса для определения вязкости разрушения K_{IC} выполнялся в соответствии с требованиями международного стандарта UIC 812.3. Испытания на статическое растяжение проводились на испытательной машине Instron, испытания на ударный изгиб – на маятниковом копре РСВ – 30. Вязкость разрушения определяли на универсальной испытательной машине ЭУС – 100 при внецентренном растяжении.

Металлографический анализ был выполнен с помощью светового микроскопа Неофот – 32. Размер зерен определяли с помощью полуавтоматического светового анализатора «Эпиквант» Межпластиночное состояние в перлите (S_0) рассчитывали методом секущих по методике Салтыкова [5]. Статистическая обработка данных проводилась с помощью пакета «Анализ данных» программного обеспечения Microsoft Excel 2003.

Результаты исследования и их обсуждение. В настоящее время известно, что любое, в том числе и хрупкое разрушение, связано с зарождением и движением дислокаций. [6, 7]. Для сталей с гомогенной структурой основным механизмом образования трещины является зернограничный механизм, связанный с образованием дислокационной субмикротрещины на границе зерна [8]. В сталях с гетерогенной структурой, к которым относятся и перлитные стали, как показано в работе [8] трещины могут возникать также и в результате растрескивания цементитных пластин перлита. Таким образом, в перлитных сталях могут существовать два независимых микромеханизма инициирования разрушения – либо зеренный (зарождение субмикротрещины на границе зерна подобно поликристал-

лическому железу), либо цементитный (иницирование субмикротрещины в результате растрескивания пластин цементита). Существование двух механизмов инициирования разрушения в перлитных сталях позволяет предположить, что влияние на их сопротивление хрупкому разрушению будут оказывать те структурные параметры, которые ответственны за действие этих механизмов, т.е. размер зерна и дисперсность перлита.

В работе были проведены исследования влияния величины зерна колесной стали марки 1 по ГОСТ 10791–2004 на комплекс служебных свойств железнодорожных колес, в том числе и на ударную вязкость.

Для получения структуры с различными размерами зерен проводилась термическая обработка опытных проб по различным режимам: осуществляли их нагрев в аустенитную область до разных температур с последующим охлаждением на воздухе. Такая обработка обеспечила формирование в стали структуры и комплекса механических свойств, представленных в табл. 1.

Таблица 1. Механические свойства и характеристики микроструктуры исследуемой стали

Температура нагрева, °С	Диаметр зерна, мм	Временное сопротивление, Н/мм ²	Предел текучести, Н/мм ²	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость, Дж/см ²
830	0,015	754	393	25	52	43,9
870	0,022	778	417	19	47	38,3
930	0,031	805	596	18	44	25,0

Анализ полученных результатов показывает, что измельчение зерна оказывает положительное влияние практически на все исследуемые механические свойства. Но степень этого влияния различна. Так изменение размера зерна от 0,031 мм до 0,015 мм, т.е. более чем в два раза, приводит к незначительному повышению временного сопротивления (на 7%) и одновременно к более ощутимому увеличению предела текучести (на 52%), относительного удлинения (на 39%) и относительного сужения (на 18%). Наиболее чувствительной к измельчению зерна оказалась ударная вязкость.

На рис.1 представлена зависимость ударной вязкости от среднего размера зерна. Из анализа табл.1 и рис.1 следует, что измельчение зерна в указанных выше пределах приводит к повышению уровня ударной вязкости на 77%, а зависимость между этими характеристиками хорошо описывается уравнением вида

$$KCU = -4236D^2 + 736,36D + 41,921 \quad (1)$$

где: KCU – ударная вязкость, Дж/см²; D – средний диаметр зерна, мм.

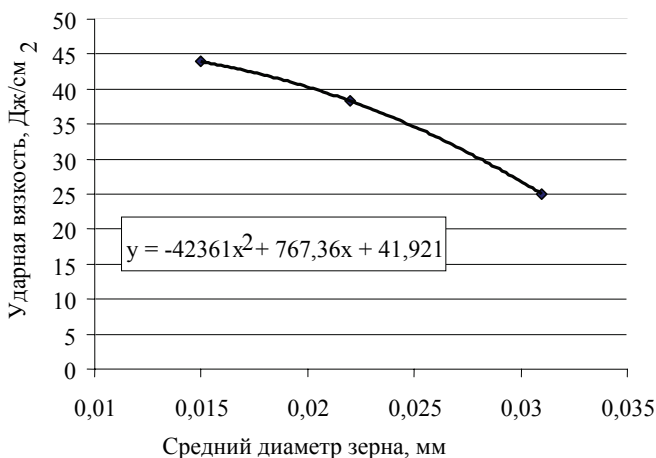


Рис. 1. Влияние среднего диаметра зерна на ударную вязкость колесной стали

Известно, что ударная вязкость характеризует сопротивление материалов локальным пластическим деформациям, которые сосредоточены в небольших объемах около концентраторов напряжения. Мелкое зерно уменьшает неоднородность распределения деформации в микрообъемах структурных составляющих, что приводит к повышению ударной вязкости [9].

В работе также исследовали влияние дисперсности перлита углеродистых сталей различного состава на ударную вязкость и другие механические свойства. Для получения структурного состояния с пластинчатым перлитом различной дисперсности опытные пробы подвергали термической обработке, которая заключалась в их нагреве до температуры выше A_{c3} и последующем охлаждении в разных средах (вода, расплав соли, масло), которые обеспечили разные скорости охлаждения ($10^0C/c$, $6^0C/c$ и $1^0C/c$ соответственно). Эти скорости соответствуют реальным скоростям охлаждения, существующим в ободьях железнодорожных колес при их ускоренном охлаждении.

Механические свойства и характеристики микроструктуры исследуемых сталей после различных скоростей охлаждения представлены в табл.2. Размер зерна при различных режимах термической обработки был одинаковым и равнялся 0,0267 мм. Анализ этой таблицы показывает, что повышение скорости охлаждения углеродистых сталей при их термиче-

ской обработке, т.е. повышение дисперсности перлита, положительно влияет на характеристики прочности, пластичности и вязкости.

Таблица 2. Механические свойства и характеристики микроструктуры исследуемых углеродистых сталей

Марка стали	Скорость охлаждения, °C/с	Временное сопротивление, Н/мм ²	Предел текучести, Н/мм ²	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость, Дж/см ²	S ₀ , мкм
Сталь 45	1	760	439	26	52	64,7	0,1834
	6	826	529	22	52	69,6	0,1588
	10	900	588	19	52	74,5	0,1223
Сталь 55	1	843	463	20	39	23	0,2017
	6	989	645	15	40	32,6	0,1673
	10	1020	668	11	38	31,7	0,1222
Сталь 65	1	906	484	17	36	25,3	0,2061
	6	1058	739	14	35	32,8	0,1745
	10	1125	816	12	36	31,2	0,1315

Исследованиями авторов работ [10, 11] было показано, что физическая прочность гетерогенных сталей и чистого железа одинакова и определяется длиной заблокированной линии скольжения. В перлитных сталях эта величина определяется шириной ферритного промежутка, а роль барьеров для движения дислокаций выполняет цементитная пластина перлита. Ускоренное охлаждение, повышая дисперсность перлита за счет уменьшения ширины ферритных и цементитных пластин, приводит к росту ударной вязкости и характеристик прочности.

Таким образом, в результате выполненных исследований было показано, что для перлитных сталей с небольшим количеством структурно-свободного феррита основными структурными показателями, которые определяют уровень их ударной вязкости, является размер зерна и дисперсность перлита. При этом как с практической, так и с научной точки зрения важным является знание степени влияния указанных структурных параметров на уровень ударной вязкости.

Для проведения этих исследований в колесопрокатном цехе ОАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ» были отобраны железнодорожные колеса Ø957мм из стали марки 2 (ГОСТ 10791–2004) в состоянии без термической обработки и термообработанные по существующей на этом предприятии технологии. В табл.3 представлены средние значения (по трем образцам) ударной вязкости и параметров структуры металла ободьев исследуемых железнодорожных колес.

Таблица 3. Механические свойства и параметры структуры металла ободьев железнодорожных колес

Состояние железнодорожного колеса	Условный номер колеса	Ударная вязкость, Дж/см ²	Диаметр зерна, мкм	Дисперсность перлита, мкм
Термоупрочненное	1	45,4	31,9	0,25685
	2	43,6	33,1	0,23215
	3	49,1	30,2	0,25605
	4	39,9	34,7	0,23605
Горячекатанное	5	22,5	117,7	0,3059
	6	23,6	100,2	0,2989
	7	21,9	162,5	0,32045
	8	20,2	129,7	0,3366

На основе этих данных с помощью множественного корреляционного анализа были рассчитаны линейные регрессионные модели влияния указанных выше параметров структуры исследуемой углеродистой стали на ее ударную вязкость. Для общей выборки данных (т.е. для колес с термообработкой и без нее) она имеет следующий вид:

$$KCU = 62,90 - 0,1773D - 55,08S_0 \quad (2)$$

где: KCU – ударная вязкость, Дж/см²; D – средний диаметр зерна, мкм; S_0 – межпластиночное расстояние в перлите, мкм.

Анализ уравнения 2 показывает, что увеличение размера зерна и межпластиночного расстояния в перлите отрицательно влияет на значения ударной вязкости (знак «-» перед вторым и третьим членом указанного уравнения). Анализ эффективности влияния этих структурных параметров показал, что в исследуемом интервале изменения размера зерна (162,5 мкм – 31,9 мкм) и при его среднем значении 80,0 мкм определяющее влияние на ударную вязкость оказывает именно этот структурный показатель. Установлено, что эффективность влияния размера зерна (80%) на ударную вязкость в четыре раза выше, чем дисперсности перлита (20%). Если отдельно проанализировать выборки для термически упрочненных и горячекатаных колес, т.е. с разными средними значениями размера зерна и дисперсности перлита, то ситуация изменится. Для термически упрочненных колес ($d_3 = 0,2457$ мкм) эффективность влияния размера зерна и дисперсности перлита составляет 90% и 10% соответственно. Аналогичное соотношение для стали железнодорожных колес без термической обработки ($d_3 = 0,3155$ мкм) составляет 10% и 90% соответственно.

На рис.2 показано изменение эффективности влияния размера действительного зерна на ударную вязкость колесной стали при увеличении абсолютного значения этого структурного показателя. Его анализ показывает, что при среднем диаметре зерна менее 60 мкм его влияние на ударную вязкость колесной стали является определяющим и составляет около 90%. При увеличении размера зерна более 60 мкм, его относительное

влияние на ударную вязкость начинает уменьшаться и достигает минимального значения (около 10%) при размере зерна около 130 мкм. Если принять во внимание то, что для колесной стали наиболее распространенной является структура с размером зерна, равным шестому – седьмому номеру по ГОСТ 5639–65, а это соответствует среднему условному диаметру зерна 39,1–26,7 мкм, то можно утверждать, что определяющее влияние на величину ударной вязкости колесной стали имеет размер действительного зерна.

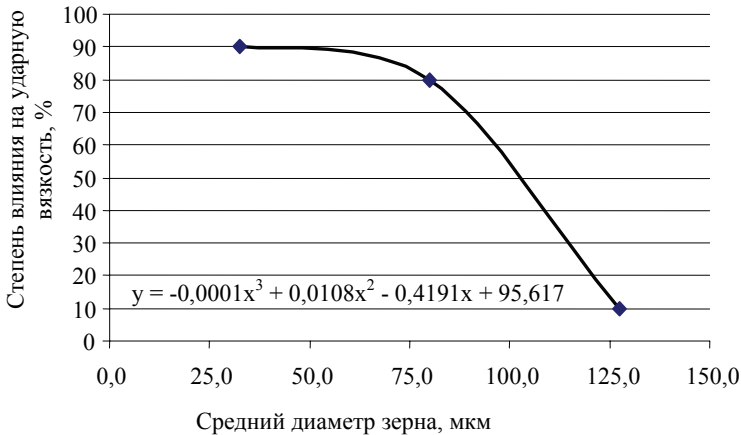


Рис.2. Зависимость эффективности влияния среднего диаметра зерна на ударную вязкость колесной стали от величины этого структурного параметра

Кроме того, в работе были проведены исследования влияния параметров структуры колесной стали на ее критический коэффициент интенсивности напряжения (вязкость разрушения K_{IC}) Уровень K_{IC} этой стали должен определяться теми же структурными показателями, которые определяют и величину ее ударной вязкости (размер зерна и дисперсность перлита).

Для исследования вязкости разрушения были изготовлены компактные образцы толщиной 30 мм, вырезанные из ободьев горячекатаных и термоупрочненных железнодорожных колес Ø957 мм, изготовленных из стали марки 2 по ГОСТ 10791–2004.

На рис.3 и 4 представлены зависимости вязкости разрушения K_{IC} исследуемой колесной стали от размера зерна. Их анализ показывает, что измельчение зерна и повышение дисперсности перлита оказывает положительное влияние на величину критического коэффициента интенсивности напряжения (вязкости разрушения) K_{IC} . Эта закономерность наблюдается для исследуемой стали независимо от ее скорости охлаждения из аустенитной области (величины дисперсности перлита).

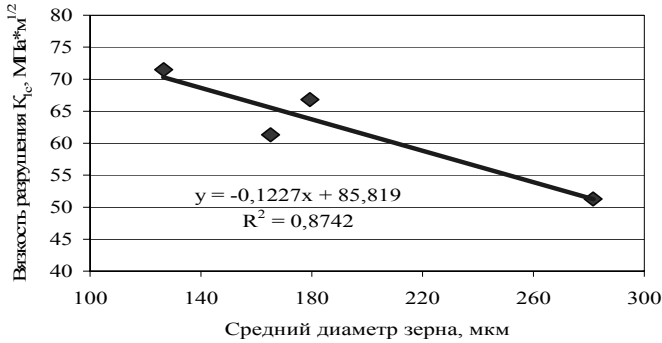


Рис.3. Зависимость вязкости разрушения K_{IC} от размера зерна ($S_0 = 0,3154$ мкм)

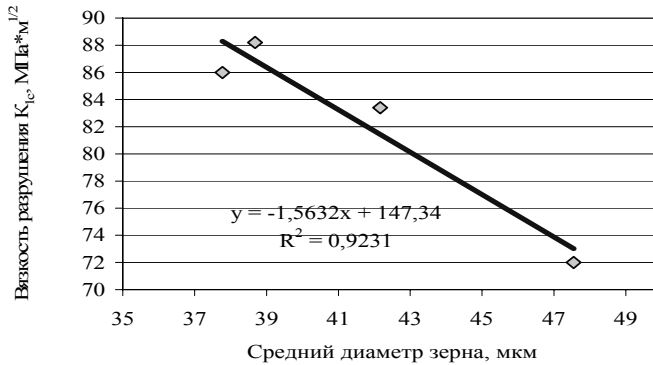


Рис.4. Зависимость вязкости разрушения K_{IC} от размера зерна ($S_0 = 0,2453$ мкм)

С учетом описанных выше микромеханизмов инициирования разрушения это можно объяснить уменьшением длины возникающей субмикротрещины и, как следствие, повышением уровня напряжения, необходимого для роста этой трещины. В условиях конкуренции двух микромеханизмов инициирования разрушения в каждом конкретном случае будет реализовываться тот, которому соответствует субмикротрещина большей длины, т.е. более низкое разрушающее напряжение. Вопрос о том, какой из исследуемых структурных параметров является определяющим по отношению к вязкости разрушения, в настоящее время является открытым и будет предметом дальнейших исследований.

Выводы. Результаты исследований показали, что для перлитных сталей с небольшим количеством структурно-свободного феррита основными структурными показателями, оказывающими определяющее влияние на уровень их вязких характеристик, является размер действительного зерна и дисперсность перлита.

С использованием полученной в работе математической модели определена эффективность влияния параметров структуры колесной стали на ее ударную вязкость. Установлено, что для перлитных сталей, применяемых для производства железнодорожных колес (номер зерна не ниже шестого), эффективность влияния величины зерна на ударную вязкость в несколько раз выше, в сравнении с дисперсностью перлита.

В работе экспериментально получены зависимости вязкости разрушения K_{IC} от размера действительного зерна и дисперсности перлита. Установлено положительное влияние этих структурных факторов на вязкость разрушения.

1. *Вязкость* разрушения среднеуглеродистой колесной стали в различных структурных состояниях / И.Г. Узлов, Л.А. Моисеева, Н.Г. Мирошниченко и др. // *Сталь*, – 1996. – №4. – С. 51 – 54.
2. *Исследование* влияния структурного состояния среднеуглеродистых сталей на показатели вязкости разрушения / И.Г. Узлов, А.И. Бабаченко, Н.А. Умеренкова и др. // *Сталь*, – 1997. – №5. – С. 57 – 60.
3. *Романив О.Н.* Вязкость разрушения конструкционных сталей. // – М: Металлургия, – 1979, – 256 с.
4. *Романив О.Н.* Структурная механика разрушения – новое перспективное направление в проблеме разрушения металлов.// *Физ.–хим. механика материалов*, – 1981. – №4. – С. 28 – 43.
5. *Салтыков С.А.* Стереометрическая металлография. // – М.: Металлургия, – 1970. – 376 с.
6. *Бернштейн Л.М., Займовский В.А.* Структура и механические свойства металлов.// – М.: Металлургия, – 1970. – 472с.
7. *Билби Б., Эшелби Дж.* Дислокации и теория разрушения. В кн. *Разрушение*. т.1. Микроскопические и макроскопические основы механики разрушения. // – М.: Мир, –1973. – С. 112–203.
8. *Мешков Ю.Я.* Физические основы разрушения стальных конструкций. // – К.: Наукова думка, – 1981. – 240с.
9. *Пашков П.О.* Растяжение и разрыв металлов. // – Ленинград: Судпромгиз, – 1952. – 115 с.
10. *Мешков Ю.Я.* Физические основы разрушения стальных конструкций. // – К: Наукова думка, –1981. – 240 с.
11. *Зависимость* предела прочности от структуры перлитной стали. / В.Н. Гриднев, Ю.Я. Мешков, Г.А. Пахаренко и др. // *Проблемы прочности*, – 1972.– №1.– С. 66 – 69.

*Статья рекомендована к печати
докт.техн.наук, проф. В.В.Парусовым*