

УДК 621.791

Е.А. Кривоносова, Т.В. Ольшанская, Т.В. Лодягина, О.А. Бурцева
E.A. Krivonosova, T.V. Olshanskaya, T.V. Lodyagina, O.A. Burtseva

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Perm National Research Polytechnic University

ВЛИЯНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ И СТРУКТУРНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ НА УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

INFLUENCE OF NONMETALLICS AND STRUCTURAL CONSTITUENTS ON IMPACT STRENGTH OF LOW-ALLOYED STEEL

Рассмотрено влияние сочетания размера неметаллических включений и структурных составляющих в зоне термического влияния на ударную вязкость стали 16Г2АФ. Получена регрессионная модель, описывающая зависимость ударной вязкости от размера неметаллических включений и доли мартенсита на участке перегрева данной стали.

Ключевые слова: неметаллические включения, зона термического влияния, термический цикл сварки, скорость охлаждения, ударная вязкость, структура, мартенсит.

Influence of nonmetallic size in combination with structural constituents in heat-affected zone on impact strength of steel 16Г2АФ is considered. Regression model generating dependence of impact strength on nonmetallic size and martensite percentage on overheating part of this steel is obtained.

Keywords: nonmetallics, heat-affected zone, welding thermal cycle, cooling rate, impact strength, structure, martensite.

Исследуемая сталь 16Г2АФ применяется для изготовления сварных конструкций ответственного назначения (резервуары высокого давления, магистральные трубопроводы, автодорожные и железнодорожные мосты). Надежность и долговечность указанных конструкций будут зависеть от свойств сварного соединения. Конструкционная прочность сварного соединения во многом определяется структурой металла, получаемой в результате неравномерного нагрева. В зоне термического влияния именно на участке перегрева (участке, нагреваемом выше температуры интенсивного роста зерна аустенита, ниже температуры плавления) вследствие воздействия термических циклов сварки происходят неблагоприятные структурные изменения:

образование закалочных структур при высоких скоростях охлаждения и трансформация оксисульфидных включений железа и марганца в результате диффузионных процессов, усиливающихся при нагреве. Формирование хрупкой мартенситной структуры при высоких скоростях охлаждения, характерных для участка перегрева зоны термического влияния, будет оказывать заметное влияние на ударную вязкость [1]. Кроме того, трансформация неметаллических включений также является одним из факторов, снижающих ударную вязкость [2]. Это связано с вероятностью образования в зоне термического влияния оксисульфидных включений разнообразной формы (в виде сплошных строчек, дисперсных цепочек), различных размеров и плотностью распределения в объеме материала вследствие их растворения, перемещения и коалесценции.

В связи с этим цель данного исследования заключается в оценке совокупного влияния доли мартенсита в структуре и размеров неметаллических включений на ударную вязкость зоны термического влияния низколегированной стали 16Г2АФ. При скоростях охлаждения $\omega_{6,5}$ в пределах 15–100 °С и, соответственно, при времени нахождения выше критической точки A_3 в пределах 2–12 с не происходит значительного увеличения размера зерна аустенита в стали 16Г2АФ вследствие торможения роста зерна дисперсными карбидами [3], поэтому этот параметр структуры не учитывали при разработке регрессионной модели.

Испытания проводились на образцах, на которых была получена структура участка перегрева, образующаяся при различных скоростях охлаждения, в результате частичного нагрева образцов на определенную длину до температуры 1350 °С проходящим электрическим током и последующего охлаждения [4]. Определение ударной вязкости проводили на имитированных образцах с концентратором напряжений типа Т [5]. На базе металлографических исследований был осуществлен мультифрактальный анализ для выявления размерности D_0 как показателя доли мартенсита в структуре и проведена оценка формы и размеров неметаллических включений [6] при различных скоростях охлаждения образцов. Для мультифрактальной параметризации были выбраны на фотографиях микроструктуры каждого образца по 9 участков размером 480×480 пикселей, проведено их преобразование по уровням серости в черно-белое изображение и обработка в программе MFRFast с генерацией меры по белым пикселям (по областям, соответствующим мартенситной фазе). В результате осреднения результатов по 9 изображениям для каждого образца были получены мультифрактальные характеристики псевдоспектров, из которых наиболее перспективно использовать характеристику D_0 [3]. Объемная доля неметаллических включений и их количество в структуре образцов оценивались с помощью программного комплекса для обра-

ботки и анализа изображения «ВидеоТест-Металл 1.0» при осреднении полученных данных в результате обработки 10 фотографий для каждого имитированного образца. Экспериментальные данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты исследования образцов из стали 16Г2АФ

Номер образца	1	2	3	4	5
Скорость охлаждения $\omega_{6,5}$, °C/c	15,2	29,8	42,4	64,9	92,6
Фрактальная размерность D_0	1,637	1,662	1,675	1,834	1,822
Доля неметаллических включений D_v , об. %	0,173 9	0,224 4	0,222 2	0,178 1	0,121 7
Количество неметаллических включений N_v , шт.	62	175	150	214	66
Ударная вязкость КСТ, Дж/см ²	143,5	145,5	126,2	109,8	84,5

При анализе данных была построена математическая модель, полученная в результате нелинейного множественного регрессионного анализа в пакете Mathcad [7]. Математическая модель (1) описывает зависимость ударной вязкости от таких параметров структуры, как фрактальная размерность, характеризующая долю мартенсита, объемная доля и количество неметаллических включений:

$$\text{КСТ} = 632 - 157 \cdot \omega_{6,5}^2 - 3267 \cdot D_v^2 + 3 \cdot D_v N_v, \quad (1)$$

где КСТ – удельная ударная вязкость образцов с концентратором напряжения типа Т, Дж/см²; D_0 – фрактальная размерность, характеризующая долю мартенсита в структуре (чем больше значение D_0 , тем выше содержание мартенсита); D_v – средняя доля неметаллических включений в структуре образца, об. %; N_v – среднее количество неметаллических включений в структуре образца, шт.

Для эффективной оценки адекватности уравнения регрессии был определен коэффициент детерминации $R^2 = 0,999$ (близость значения к единице свидетельствует о соответствии регрессии исходным данным). Значение F -критерия, равное 536, свидетельствует о значимости построенного уравнения регрессии.

Для более наглядного представления соотношения расчетных и экспериментальных данных на рисунке изображены зависимости значений ударной вязкости, полученные по математической модели (1) и при обработке результатов исследования, от скорости охлаждения, так как она и определяет параметры структуры, получаемые при нагреве и охлаждении. График зависимости экспериментальных значений был получен при построении линейной парной регрессионной модели:

$$KCT = -21 \cdot \omega_{6,5}^{0,6} + \frac{590\,400}{\omega_{6,5}^4} + 88 \cdot \ln(\omega_{6,5}), \quad (2)$$

где $\omega_{6,5}$ – скорость охлаждения образцов в интервале температур 600–500°C, °C/с.

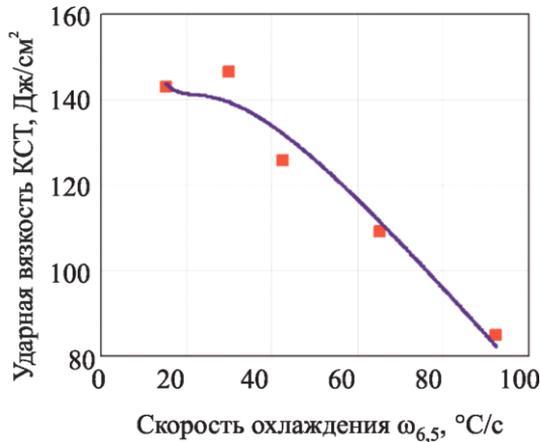


Рис. Зависимость ударной вязкости участка перегрева стали 16Г2АФ от скорости охлаждения: ■ – данные, полученные по математической модели (1); — экспериментальные данные, полученные с помощью уравнения (2)

Рассчитанные по модели (1) данные и их сравнение с экспериментальными приведены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение расчетных и экспериментальных значений ударной вязкости

Номер образца	Значение ударной вязкости КСТ, Дж/см ²		Погрешность, %
	расчетное	экспериментальное	
1	143,1	143,5	0,21
2	146,4	145,5	4,17
3	125,7	126,2	4,66
4	109,4	109,8	1,67
5	85,0	84,5	3,01

При построении математической модели акцент ставился на выявление того, какой параметр структуры в большей степени оказывает влияние на ударную вязкость исследуемой стали 16Г2АФ. Для сравнения воздействия параметров структуры на ударную вязкость стали 16Г2АФ были вычислены стандартизованные коэффициенты регрессии $b(D_0)$, $b(D_n)$, и $b(D_n, N_v)$, оцени-

вающие силу воздействия параметра на зависимую переменную: чем больше его значение по модулю, тем сильнее влияние параметра. Получены следующие значения стандартизованных коэффициентов:

– $b(D_0) = -2,029$: описывает влияние доли мартенсита на ударную вязкость;

– $b(D_n) = -1,909$: характеризует влияние доли неметаллических включений на ударную вязкость;

– $b(D_n, N_v) = 1,726$: определяет совместное влияние доли и количества неметаллических включений на ударную вязкость, что косвенно будет характеризовать влияние размера неметаллических включений на данное свойство.

На основании приведенных данных можно сделать следующие выводы:

1. На ударную вязкость участка перегрева стали 16Г2АФ влияет примерно в равной степени и наличие мартенсита, и присутствие неметаллических включений в структуре. Стандартизованный коэффициент регрессии, характеризующий влияние фрактальной размерности D_0 на ударную вязкость, имеет более высокое значение по модулю, поэтому количество мартенсита в структуре влияет на это свойство в большей степени.

2. Увеличение фрактальной размерности, характеризующей содержание мартенсита в структуре зоны термического влияния стали 16Г2АФ на 10 % от исходного значения (1,637), снижает ударную вязкость на 97,4 Дж/см² при неизменной доле и количестве неметаллических включений.

3. Повышение доли неметаллических включений на 10 % от исходного значения (0,1739 об. %) вызывает падение ударной вязкости на 19,1 Дж/см² при неизменной доле мартенсита и количестве неметаллических включений.

4. Повышение количества неметаллических включений на 10 % от исходного значения (62 шт.) при неизменной доле мартенсита и неметаллических включений способствует повышению ударной вязкости на 3,5 Дж/см², что объясняется уменьшением размера неметаллических включений и увеличением расстояния между ними.

5. Таким образом, ударная вязкость стали 16Г2АФ недопустимо снижается в том случае, когда наблюдается неблагоприятное сочетание параметров структуры, характеризующих долю мартенсита и размер неметаллических включений: увеличение доли неметаллических включений свыше 0,19 об. % и их количество менее 85 шт., фрактальная размерность, описывающая долю мартенсита, более 1,8. При этом прогнозируемая ударная вязкость составит 41,6 Дж/см², что недопустимо при температуре эксплуатации конструкций из данной стали –40 °С согласно ГОСТ 19281–89.

Список литературы

1. Влияние параметров режимов сварки на структуру и свойства зоны термического влияния сталей с карбонитридным упрочнением / Е.А. Кривоносова, В.М. Язовских, О.А. Рудакова, Г.В. Встовский // Тяжелое машиностроение. – 2009. – № 7. – С. 23–26.
2. Явойский В.И., Рубенчик Ю.И., Оженко А.П. Неметаллические включения и свойства сталей. – М.: Металлургия, 1980. – 176 с.
3. Кривоносова Е.А., Рудакова О.А., Встовский Г.В. Мультифрактальный анализ структурного состава зоны термического влияния сталей с карбонитридным упрочнением // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2010. – № 6. – С. 26–30.
4. Ольшанская Т.В., Рудакова О.А., Лодягина Т.В. Разработка методики исследования влияния параметров режимов сварки на свойства зоны термического влияния микролегированных сталей типа 16Г2АФ и 10Г2ФБ // Перспективные технологии и материалы: материалы междунар. науч.-техн. конф., г. Пермь, 24 нояб. 2008 г. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – С. 377–385.
5. Ольшанская Т.В., Рудакова О.А. Ударная вязкость зоны термического влияния сталей типа 16Г2АФ и 10Г2ФБ // Упрочнение рабочих поверхностей деталей машин: научно-техническая конференция, посвященная 85-летию проф. М.И. Разикова в рамках 7-й Международной специализированной выставки «Сварка, контроль и диагностика», г. Екатеринбург, 5 дек. 2007 г. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ–УПИ, 2007. – С. 37–38.
6. Кривоносова Е.А., Лодягина Т.В. Влияние термического цикла сварки на трансформацию неметаллических включений в зоне термического влияния при сварке стали 16Г2АФ [Электронный ресурс] // Изв. Самар. науч. центра РАН. – 2013. – Т. 15, № 6 (2). – URL: http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2013/2013_6_391_394.pdf (дата обращения: 01.11.2013).
7. Воскобойников Ю.Е. Регрессионный анализ данных в пакете Mathcad: учеб. пособие. – СПб.: Лань, 2011. – 224 с.

Получено 6.02.2014

Кривоносова Екатерина Александровна – доктор технических наук, профессор, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: katerina.kkkkk@mail.ru).

Ольшанская Татьяна Васильевна – кандидат технических наук, доцент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: tvo66@rambler.ru).

Лодягина Татьяна Валерьевна – старший преподаватель, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: talod@rambler.ru).

Бурцева Ольга Александровна – старший научный сотрудник, 4-й Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации (141091, г. Юбилейный, Московская обл., ул. М.К. Тихонравова, 29, e-mail: olga_rudakova_16@mail.ru).

Krivososova Ekaterina Aleksandrovna – Doctor of Technical Sciences, Professor, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: katerinakkkkk@mail.ru).

Olshanskaya Tatiana Vasilievna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: tvo66@rambler.ru).

Lodyagina Tatiana Valerievna – Senior Lecturer, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: talod@rambler.ru).

Burtseva Olga Aleksandrovna – Senior Researcher, 4th Central Research Institute of the Defense Ministry of Russia (141091, Ubileyniy, Tihonravova st., 29, e-mail: olga_rudakova_16@mail.ru).