

© С.В. Гладковский, Е.М. Бородин, С.В. Смирнова, 2012 г.
Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург
© Т.П. Богданова, М.А. Журнов, 2012 г.
ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
г. Екатеринбург

ОЦЕНКА ХРУПКОЙ ПРОЧНОСТИ Fe-Cr-Ni-Mo МАРТЕНСИТНО-СТАРЕЮЩЕЙ СТАЛИ МЕТОДОМ ИНСТРУМЕНТИРОВАННЫХ УДАРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Введение

Известно [1; 2], что мартенситно-стареющие стали (МСС) на Fe-Ni-Co-Mo и Fe-Ni-Cr-Mo основах благодаря низкому содержанию углерода (до 0,03 %) и вредных примесей (S, P), а также легированию никелем характеризуются сочетанием высоких значений прочности, пластичности и статической трещиностойкости (K_{1C}). Однако характеристики ударной вязкости и динамической трещиностойкости МСС после упрочняющего старения, определенные на образцах с острым V-образным надрезом и усталостной трещиной, оказываются существенно ниже по сравнению с аналогичными характеристиками среднеуглеродистых конструкционных сталей. В связи с этим целью настоящего исследования было определение комплекса механических свойств высокопрочной МСС, изучение строения изломов и особенностей разрушения с использованием метода инструментированных ударных испытаний.

Материалы и методика

В качестве объекта исследования была выбрана мартенситно-стареющая сталь ЭП679, содержащая в своем составе: С – 0,03 %; Cr – 13,7 %; Ni – 8,21 %; Mo – 0,64 %; Ti – 1,23 %; Al – 0,23 %. Данная сталь близка по своему химическому составу к широко распространенной стали ЭП678, но отличается от последней повышенным содержанием титана и молибдена, входящих в состав упрочняющих интерметаллидных фаз, и, соответственно, более высокими прочностными свойствами. Стандартные образцы для проведения механических испытаний на растяжение и ударный изгиб вырезались из кованных прутков (квадрат 14). Заготовки образцов закаливались в воде после нагрева до 920 °С и подвергались старению в интервале температур 500–620 °С с выдержкой 3 ч. Испытания на одноосное растяжение образцов диаметром 5 мм по ГОСТ 1497 при комнатной температуре проводились на испытательной машине Instron-8001. Испытания на ударный изгиб образцов типа 11 по ГОСТ 9454-84 размером 10x10x55 мм с V-образным надрезом глубиной 2 мм проводились при комнатной температуре на инструментированном маятниковом копре

«Tinius Olsen» IT 542 с записью диаграммы ударного нагружения в координатах «усилие (сила) – деформация (перемещение). Разделение общей работы разрушения ударного образца ($A=A_3+A_p$) на ее составляющие – работу зарождения трещины (A_3) и работу распространения трещины (A_p) осуществлялось по методике, описанной в работе [3]. В процессе ударных испытаний использовалась система регистрации сигналов акустической эмиссии Vallen AMC-5 Vallen-Systeme. Для анализ строения изломов ударных образцов использовался сканирующий электронный микроскоп TESCAN VEGA II XMU.

Обсуждение результатов

Результаты испытаний на растяжение, приведенные в табл. 1, свидетельствуют о том, что для изученных режимов обработки наиболее высокие прочностные свойства соответствуют режиму обработки 2 (Закалка + Стар. 500 °С). Дальнейшее повышение температуры старения до 620 °С вызывает снижение прочностных характеристик до уровня, близкого к закаленному состоянию. При этом пластические свойства стали как в исходном закаленном состоянии, так и после упрочняющего (500–540 °С) и разупрочняющего старения (580–620 °С) находятся на достаточно высоком уровне ($\delta = 8–16\%$; $\psi = 49–80\%$).

Таблица 1

Механические свойства стали ЭП679 в зависимости от режимов обработки

№ п/п	Режим термообработки	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
1	Закалка 920 °С	943	750	14	80
2	Закалка + Стар. 500 °С	1705	1670	8	49
3	Закалка + Стар. 540 °С	1565	1530	9,5	58
4	Закалка + Стар. 580 °С	1415	1360	15	65
5	Закалка + Стар. 620 °С	1195	853	16	67

Согласно приведенным в табл. 2 результатам ударных испытаний изученная сталь обладает наибольшими значениями ударной вязкости в закаленном состоянии, а минимальными – после старения на максимальную прочность (Закалка + Стар. 500 °С). Наблюдается тенденция значительного роста ударной вязкости с повышением температур старения от 500 до 620 °С. При этом рост температуры старения приводит к почти 20-кратному снижению отношения работы зарождения трещины (A_3) к работе ее распространения (A_p). Наименьшее соотношение величин $A_3/A_p = 0,27$ соответствует режиму обработки № 1, что указывает на большой запас конструкционной прочности данной стали в закаленном состоянии без старения.

Таблица 2

Результаты ударных испытаний стали ЭП679*

№ п/п	Режим термообработки	A, Дж	A _з , Дж	A _р , Дж	A _з /A _р	KCV, МДж/м ²	J _{1d} , МДж/м ²
1	Закалка 920 °С	155	32,9	122,1	0,27	1,98	0,82
2	Закалка + Стар.500 °С	3,1	-	-	-	0,04	-
3	Закалка + Стар.540 °С	12,9	11,7	1,2	9,75	0,125	0,30
4	Закалка+ Стар.580 °С	30,2	17,9	12,3	1,45	0,38	0,45
5	Закалка +Стар.620 °С	83,8	29,1	54,7	0,53	1,07	0,73

* Качество записанной диаграммы удара после старения при 500 °С не позволило разделить общую работу разрушения на составляющие

Рассчитанные по данным инструментированных ударных испытаний по формуле 1 в соответствии с методикой работы [4] параметры динамической трещиностойкости на основе энергетического критерия разрушения - контурного интеграла Райса-Черепанова-Билби (J_{1d}) указывают на хорошее соответствие значений ударной вязкости и динамической трещиностойкости стали ЭП679 для изученных режимов термической обработки. Вместе с тем следует отметить, что если значения KCV закаленной и состаренной при 620°С МСС различаются почти в 2 раза, то значения J_{1d}

$$J_{1d} = 2 A_3/B(W-a), \quad (1)$$

где A_з – работа зарождения трещины; В – ширина образца; W – высота образца; а – длина концентратора напряжений (надреза или усталостной трещины) находятся на достаточно близком уровне (табл. 2). Такое различие в характеристиках ударной вязкости и динамической трещиностойкости может быть связано с тем, что согласно [5] в сталях этого класса при температурах старения свыше 560–580 °С образуется до 40 % метастабильного ревертированного аустенита, способствующего повышению сопротивления материала хрупкому разрушению.

Наблюдаемое изменение характеристик ударной вязкости и динамической трещиностойкости стали ЭП678 в зависимости от режимов ее обработки хорошо согласуется с результатами фрактографического анализа поверхности изломов (рис. 1).

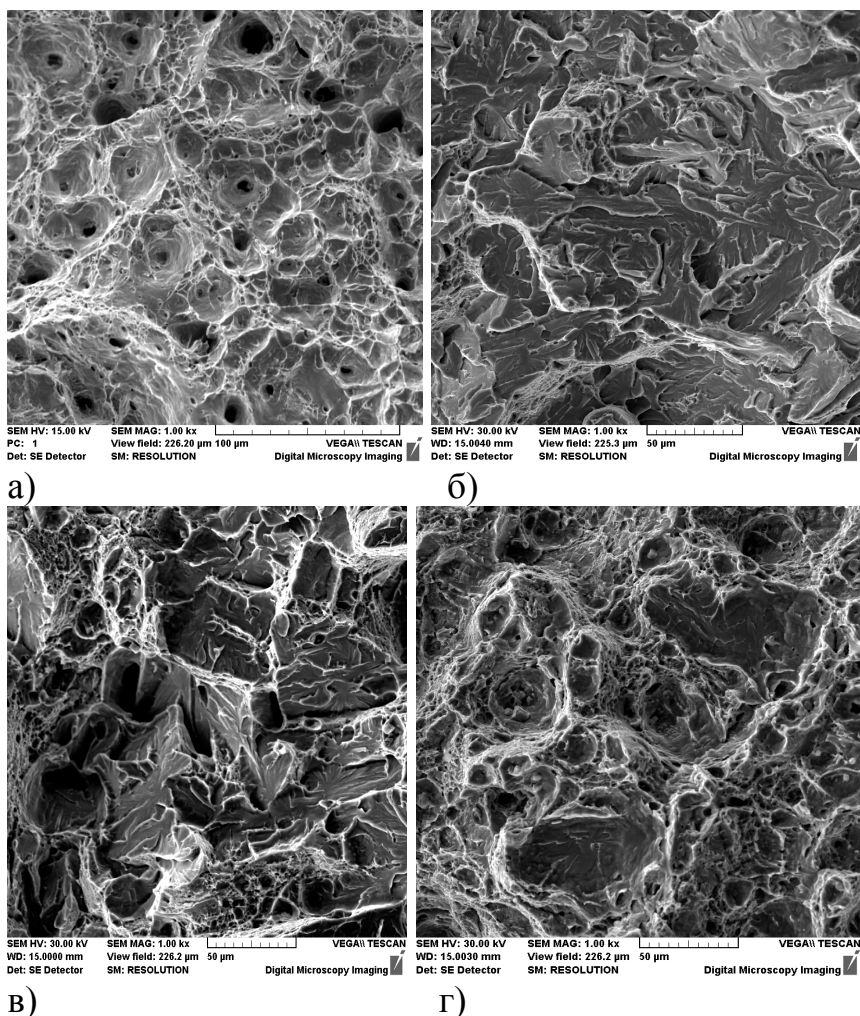


Рис. 1. Микростроение изломов ударных образцов стали ЭП679:
 а) закаленное состояние; б) старение 540 °С; в) старение 580 °С;
 г) старение 620 °С

Как видно из рис. 1, изломы закаленной стали (а) и состаренной при 620 °С (г) имеют характерное для высокоэнергоемкого разрушения вязкое ямочное строение. Напротив, в изломах образцов, состаренный при 540 °С (б) и 580 °С преобладают хрупкие элемента разрушения в виде фасеток квазискола. Дополнительная информация о развитии процесса динамического разрушения может быть получена на основе анализа экспериментальных диаграмм ударного нагружения (рис. 2). Как видно на рис. 2, тип диаграммы удара существенно меняется в зависимости от уровня вязкости и динамической трещиностойкости стали. Скачки нагрузки и ее резкое падение после достижения максимума «хрупкий скачок трещины» (рис. 1а, рис. 1б) свидетельствуют о нестабильности

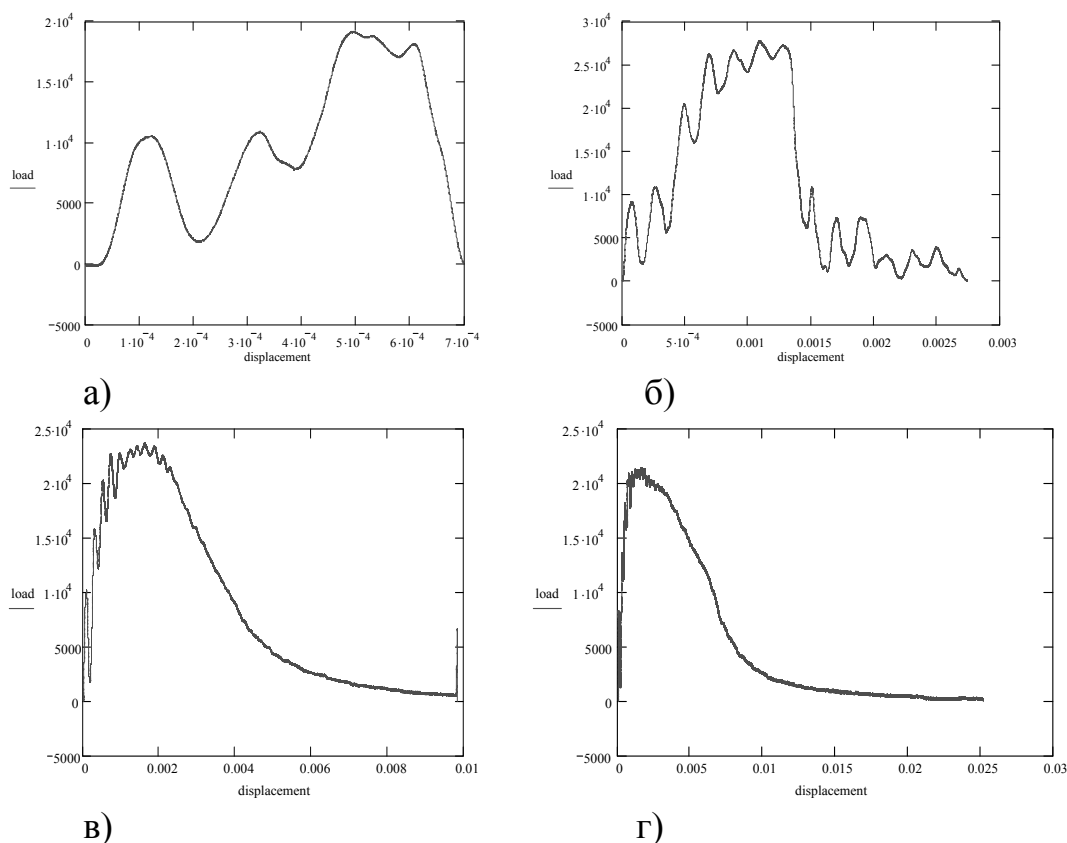


Рис. 2. Диаграммы ударного нагружения стали ЭП679:
 а) старение 540 °С; б) старение 580 °С; в) старение 620 °С; г) закалка

процесса разрушения и преобладании хрупкого механизма роста трещины. Для закаленных и состаренных при повышенной температуре (620 °С) образцов характерны сглаженные диаграммы, указывающие на вязкий характер разрушения (рис. 1в, рис. 1г). Для изучения особенностей процесса разрушения стали ЭП679 при ударных испытаниях параллельно с диаграммой нагружения записывались сигналы акустической эмиссии. Используемая аппаратура позволила зафиксировать единый акустический сигнал, интегрирующий звуковые импульсы от соприкосновения маятника с образцом и от разрушения самого образца. Однако анализ частотной зависимости записанного сигнала в координатах «Уровень сигнала – частота» выявил существенное различие в спектре акустической эмиссии для образцов с различным уровнем хрупкой прочности (рис. 3а, рис. 3б). Установлено, что наиболее высокий уровень сигнала акустической эмиссии соответствует частотам 80–180 кГц. С повышением вязкости образца в области более высоких частот (200–300 кГц) появляются дополнительные менее интенсивные сигналы.

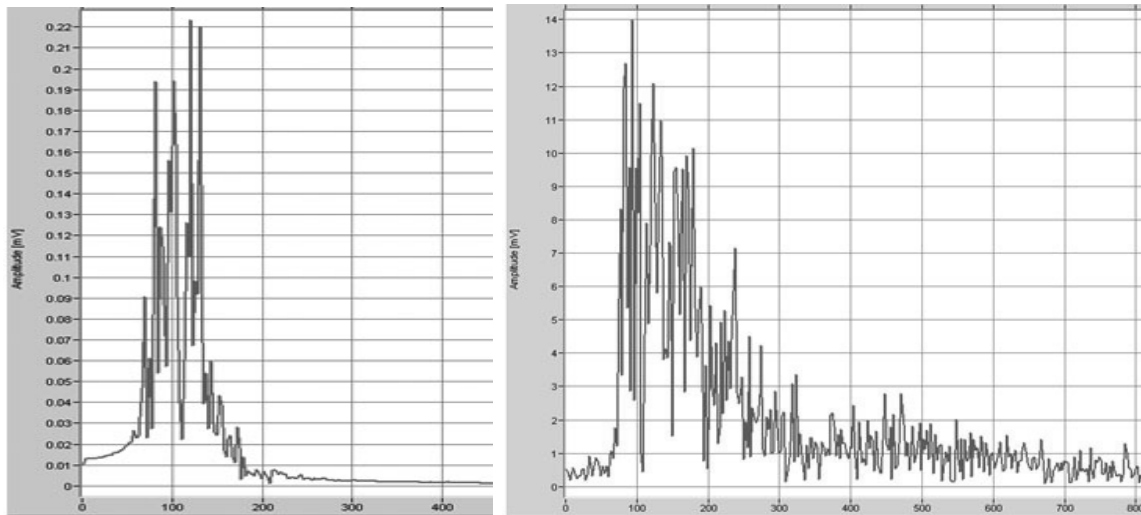


Рис. 3. Частотный спектр сигнала акустической эмиссии ударного образца
 а) старение 540 °С; б) старение 580 °С

Заключение

Проведенные на мартенситно-стареющей стали ЭП679 сравнительные испытания на одноосное растяжение и ударный изгиб выявили различный запас ее вязких свойств в условиях статического и динамического нагружения. Если пластические характеристики стали после старения на максимальную прочность при статическом растяжении сохраняются на достаточно высоком уровне, то полученные значения ударной вязкости и трещиностойкости указывают на низкий уровень хрупкой прочности данного материала. Это указывает на необходимость использования более высоких температур старения Fe-Ni-Cr-Mo МСС с повышенным содержанием титана и алюминия применительно к изделиям, эксплуатирующихся в условиях ударных нагрузок.

Использование инструментированных ударных испытаний высокопрочной МСС с записью диаграммы нагружения существенно расширяет возможности стандартных испытаний на ударную вязкость и дополнительно позволяет определять параметры динамической трещиностойкости и оценивать соотношение работ зарождения и распространения трещины. Регистрация и анализ сигналов акустической эмиссии при ударных испытаниях может рассматриваться в качестве перспективного метода изучения процессов хрупкого разрушения высокопрочных металлических материалов.

Авторы выражают благодарность к.т.н. Вичужанину Д.И. за помощь в проведении механических испытаний и записи сигналов акустической эмиссии.

Список использованных источников

1. *Перкас М.Д., Кардонский В.М.* Высокопрочные мартенситно-старееющие стали. М.: Металлургия, 1970. 224 с.
2. *Бирман С.Г.* Экономнолегированные мартенситностареющие стали. М.: Металлургия, 1974. 208 с.
3. *Георгиев М.* Пукнатинуоустойчивост на металите при ударно натоварване. София: БУЛВЕСТ 2000, 2007. 231 с.
4. *Ботвина Л.Р.* Разрушение. Кинетика, механизмы, общие закономерности // Ин-т металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН. М.: Наука, 2008. 334 с.
5. *Гладковский С.В., Калетина Ю.В., Филиппов А.М.* [и др.] Метастабильный аустенит как фактор повышения конструктивной прочности мартенситностареющих сталей // ФММ. 1999. Том 87, № 3. С. 86–96.