

УДАРНО-УСТАЛОСТНАЯ И СТАТИЧЕСКАЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОЛОСЫ ПЛАСТИЧНОСТИ У ВЕРШИНЫ ИСХОДНОЙ ТРЕЩИНЫ

Николай Козут

*Львовский национальный аграрный университет
ул. В. Великого, 1, Дубляни, Украина.*

Nikolay Kohut

*Lviv National Agrarian University
V. Velykogo Str. 1, t. Dubljany, Ukraine.*

Аннотация. Описаны инженерные методики определения ударно-усталостной прочности $N_{цикл}$, ударно-усталостной $K_{I_{fc}}$ и статической K_{Ic} трещиностойкости термически упрочненных пружинных сталей 60С2А, 65Г и конструкционной легированной стали 30ХГСА, а также серого СЧ20 и высокопрочного ВЧ50-2 чугунов на образцах, защемленных вблизи бокового концентратора балочных образцов и деформируемых ударно-усталостным консольным изгибом на специальной восьмиместной установке.

Установлено, что максимальные значения усталостной прочности $N_{цикл}$, ударно-усталостной $K_{I_{fc}}$ и статической K_{Ic} трещиностойкости из исследуемых материалов имеют сталь 30ХГСА, затем – 65Г и 60С2А, далее высокопрочный чугун ВЧ50-2 и СЧ20. Их значения качественно подтверждены деформационными пластическими полосами (изоклинами) на продолжении исходной трещины в материале балки, установленными на шлифах с помощью инструментального микроскопа, которые характеризуют полученные большие значения трещиностойкости K_{Ic} по сравнению с $K_{I_{fc}}$ соответственно.

Ключевые слова: балка, усталостная прочность, ударно-усталостная и статическая трещиностойкость, напряжения изгиба, пластические полосы, боковая трещина.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ.

Для определения фундаментальных характеристик трещиностойкости металлических материалов в условиях плоской деформации K_{Ic} или плосконапряженного состояния K_c служат экспериментальные исследования [1-3], реализуемые на различных типах образцов с исходными трещинами - плоских, балочных, цилиндрических, призматических, дисковых и других [4-7]. Предельное значение коэффициента интенсивности напряжений (КИН) у вершины трещины для заданной схемы деформирования образца определяют с учетом его геометрии (размеров и трещины), а также структурного состояния материала (режимов термообработки, способа получения) та физико-механических свойств (прочности, пластичности). При этом нужно учитывать вид и способ нагружения испытываемого образца.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Трещиностойкость материалов средней и низкой прочности, например - сталей, определяется деформационным критерием [8-13]: δ_c – критическим раскрытием трещины, основанным на концепции модели Леонова-Панасюка-Андрейкива и J-интегралом или R-кривыми [14-18]. Использование этих критериев целесообразно в определенной мере для материалов со значительными пластическими деформациями на продолжении фронта исходной трещины.

Вместе с тем, сама концепция контурного энергетического интеграла, сформулированная независимо Черепановым [19, 20] и Райсом [21, 22], нуждается в некоторых доработках [23-25], хотя основные положения и методика проведения исследований методом J-интеграла нашли свое применение в международных стандартах [26-30].

Необходимо отметить, что главной проблемой при реализации таких исследований, является отсутствие единой методики измерения фактического раскрытия трещины δ_c . До сих пор не установлено на каком расстоянии от вершины микротрещины (сотые, тысячные миллиметра или диаметр зерна структуры материала), можно корректно определить раскрытие трещины. Так, в работах [31, 32] было показано, что для узких прослоек призматических образцов с трещиной параметр δ_c можно подсчитать по формуле:

$$\delta_c = \delta_{пл} - \delta_{упр}, \quad (1)$$

где: $\delta_{пл}$ – пластическая и $\delta_{упр}$ – упругая составляющие деформаций при разрушении материала.

В то же время, собственно, методика измерения δ_c сложна в реализации, требует жестких испытательных (разрывных) машин, сложную контрольно-измерительную технику (датчики, устройства и аппаратуру), а также весьма трудоемкая технология изготовления опытного образца с исходной трещиной без образования механического наклепа впереди ее фронта. До настоящего времени не выделен эффективный тип испытываемого лабораторного образца и схема его деформирования для достоверного установления истинных значений КИН, например: K_I – нормальный отрыв, K_{II} – двиг, K_{III} – кручение или

параметра δ_c для заданного материала, а не для исследуемого образца [33, 34].

В данной статье приведены новые методики определения характеристик трещиностойкости K_{Ic} , K_{Ijc} в условиях квазихрупкого разрушения и параметров пластически-деформированной области, связанных с раскрытием трещины δ_c для некоторых конструкционных материалов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цель работы – исследовать конструкционные термически упрочненные стали 60С2А, 65Г, 30ХГСА, а также серый СЧ20 и высокопрочный ВЧ50-2 чугуны на балочных образцах, зашпеленных вблизи бокового концентратора и деформированных ударно-усталостным консольным изгибом на специальной установке; определить ударно-усталостную прочность $N_{цикл}$, ударно-усталостную трещиностойкость K_{Ijc} , и статическую трещиностойкость K_{Ic} , а также выявить пластически-деформированную область (полосы скольжения), формирующуюся впереди раскрытой трещины на боковой поверхности балочного образца.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Для корректного определения характеристики трещиностойкости (K_{Ic}) в случае изгиба балочного образца с боковой трещиной, толщина образца должна удовлетворять условию [35]:

$$b \geq 2,5(K_{Ic}/\sigma_{0,2})^2, \quad (2)$$

где: $\sigma_{0,2}$ – предел текучести материала при условии 2%-ной деформации.

Поскольку у вершины исходной трещины (рис. 1) всегда присутствуют пластические деформации, которые возникают во время деформирования консольным изгибом балочного образца в виде двух полос (изоклин), направленных под углом примерно $\alpha=72^\circ$ к плоскости трещины, то приблизительно длину пластической области можно вычислить по формуле [36]:

$$l^* = 0,184(K_{Ic}/\sigma_{0,2})^2. \quad (3)$$

С учетом размеров балочного образца длину исходной трещины можно найти из равенства:

$$l = h - m, \quad (4)$$

где: m – высота балки в плоскости боковой трещины; h – высота балки.

Тогда толщина изоклины:

Таблица 1. Режимы термической обработки и механические характеристики призматических балок

Table 1. Heat treatment and mechanical properties of prismatic beams

Марка материала	Режимы термической обработки призматических заготовок	Прочность σ_b , МПа	Твердость
Серый чугун СЧ20	Низкотемпературный отжиг после нагрева от 873 К в течении 5–8 ч., охлаждения с печью до 793 °С и последующее охлаждение на воздухе	205	210 HB
Высокопрочный чугун ВЧ50-2	Закалка после нагрева от 1173 К, охлаждение в масле и низкотемпературный отжиг при 773 К в течении 6 ч., охлаждение с печью до 473 К и последующее охлаждение на воздухе	380	225 HB
Сталь 60С2А	Закалка после нагрева от 1193 К, охлаждение в масле и отпуск при 673 К в течении 2 ч.	1580	54 HRC
Сталь 65Г	Закалка после нагрева от 1153 К, охлаждение в масле и отпуск при 773 К в течении 2 ч.	1630	48 HRC
Сталь 30ХГСА	Закалка после нагрева от 1225 К, охлаждение в масле и отпуск при 723 К в течении 2 ч.	1695	42 HRC

$$x_0 = 0,035m. \quad (5)$$

Если принять расчетное $B=20$ мм и оптимальный относительный размер боковой трещины $\lambda=m/h=0,7$, то можно определить длину пластической области l^* и толщину B балочного образца, исходя из соотношения:

$$l^* = x_0 \cdot \lambda \cdot b \cdot \operatorname{tg} 72^\circ = 0,35 \cdot 0,7 \cdot b \cdot \operatorname{tg} 72^\circ. \quad (6)$$

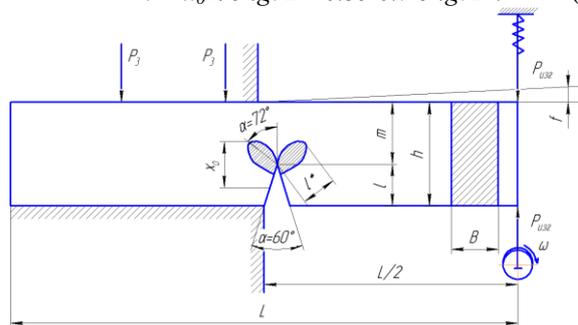


Рис. 1. Схема ударно-усталостного деформирования консольным изгибом балки, зашпеленной вблизи бокового концентратора, и параметры пластически-деформируемой области в вершине исходной трещины

Fig. 1. Driving shock fatigue deformation scheme of cantilever bending beam clamped near the hub side and the parameters of the plastically deformable region at the top of the initial crack

Если для полученного $B = 21$ мм выполняются условия автомодельности зоны предразрушения [37], то тогда характеристика $K_c = K_{Ic}$, следовательно толщина балки B – достаточная для испытываемого образца. В случае неудовлетворения условий автомодельности толщину балочного образца нужно увеличить.

В качестве исследуемых материалов выбраны серый чугун СЧ20 после низкотемпературного отжига с феррито-перлитной структурой та пластической формой графита и для сравнения высокопрочный чугун ВЧ50-2, модифицированный магнием с добавками кремния также после низкотемпературного отжига, в котором графит в структуре имеет глобулярную форму небольших размеров.

Кроме чугунов использованы термически упрочненные пружинные стали 60С2А, 65Г и конструкционная легированная сталь 30ХГСА.

Режимы термической обработки перечисленных материалов, выполненные на призматических заготовках (200x36x26 мм), представлены в табл. 1.

Грани призматических заготовок подвергали механическому разрезанию, фрезерованию и шлифованию. Посередине полученного образца наносили боковой концентратор шириной 3 мм и глубиной 8 мм. Финишным шлифованием концентратора шлифовальным кругом с V-образным углом заточки $\alpha = 60^\circ$ и остротой $\rho \leq 0,1$ мм глубину концентратора доводили до 10 мм (рис. 2).

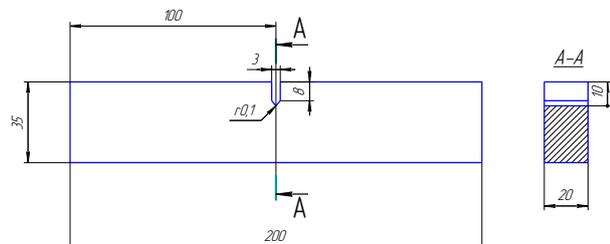


Рис. 2. Геометрические размеры балочного образца с боковым концентратором

Fig. 2. The geometrical dimensions of the sample beam side hub

Оптимальный прогиб f на консоли балки (рис. 1) и напряжения σ , которые возникают у дна концентратора в процессе ударно-усталостного деформирования можно подсчитать определив усилие изгиба $P_{изг}$ на консоли балки через ее геометрические размеры и модуль упругости по формуле:

$$P_{изг} = \frac{Eh^3bf}{L^2} \quad (7)$$

Тогда максимальные напряжения, которые возникают у дна концентратора вблизи защемления балки будут равны:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W_{max}} = \frac{6PL}{h^2b} \quad (8)$$

Где: M_{max} , W_{max} – моменты изгиба и сопротивления балки соответственно.

Подставляя (8) в (7), получим максимальные напряжения для балки с концентратором:

$$\sigma_{max} = \frac{3Efh}{2L^2}, \text{ откуда } f = \frac{2L^2\sigma_{max}}{3Eh} \quad (9)$$

Если задать размеры балки: $b=20$ мм, $h=35$ мм, $\rho=0,1$ мм, $L=100$ мм, предел текучести стали 60С2А $\sigma_\tau=1180$ МПа, модуль упругости $E=2,1 \cdot 10^6$ МПа и подставить эти значения в (9), то получим прогиб $f=1,0$ мм, который обеспечит достаточные условия деформирования балки без наклепа, а значит получить фактическое значение $K_{1с}$ этой стали.

Для реализации ударно-усталостного деформирования балочных образцов с боковым концентратором (рис. 2), изготовленных из перечисленных материалов и режимов (табл. 1), воспользовались специальной восьмиместной установкой [38], из которой показан узел базирования и ударно-усталостного консольного деформирования балочного образца (рис. 3), для которого усилие нагружения задавали от эксцентрикового распределительного вала и толкателя-датчика, установленных на базе

блока двигателя внутреннего сгорания автомобиля ЗИЛ-131.

Экспериментальные исследования провели на стадии инициирования ударно-усталостных трещин, базирова балки концентратором вниз по жесткой схеме (рис. 3). Нагружение балок задавали двумя режимами деформирования при прогибах $f=2$ мм и $f=1$ мм для сталей 30ХГСА, 65Г, 60С2А. Нагружение образцов высокопрочного ВЧ50-2 и серого СЧ20 чугунов осуществляли при прогибах $f=0,6$ мм и $f=0,3$ мм соответственно.

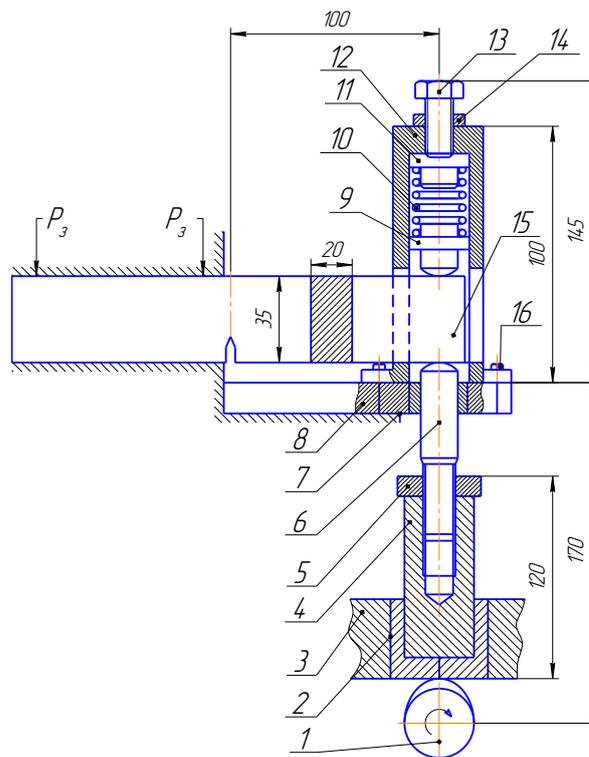


Рис. 3. Общий вид узла ударно-усталостного консольного деформирования балочного образца с концентратором: 1 – эксцентриковый распределительный вал; 2 – стакан; 3 – корпус блока; 4, 6 – толкатель с датчиком; 5 – фиксирующая гайка; 7 – бронзовая втулка; 8 – плита; 9 – подпятник; 10 – пружина; 11 – пробка; 12 – колпак специальный; 13 – болт зажимной; 14 – гайка; 15 – призматический образец; 16 – болт затяжной; детали 5, 6, 9 – термически упрочнены

Fig. 3. General view of a shock-fatigue cantilever beam deformation of the sample concentrator: 1 – eccentric camshaft; 2 – glass; 3 – unit housing; 4, 6 – plunger sensor; 5 – locking nut; 7 – bronze bushing; 8 – a plate; 9 – thrust bearing; 10 – a spring; 11 – a stopper; 12 – cap specialty; 13 – a bolt of clamping; 14 – a nut; 15 – prismatic pattern; 16 – a bolt of protracted; items 5, 6, 9 – thermally hardened

Усилие зажима балок со всех сторон (сверху и сбоку) для исследуемых материалов контролировали ручным динамометром силы, которое было максимально: $P_3 = 20$ кН. Усилия изгиба $P_{изг}$ балки на консоли определяли путем тарировки датчика – толкателя с помощью динамометра силы и контрольно-измерительного прибора (рис. 4). Период и частота

цикла ударно-усталостного нагружения балки на указанной установке составляли: $T=60 / n=0,857$ с; $a=n/60=1.666$ с⁻¹.

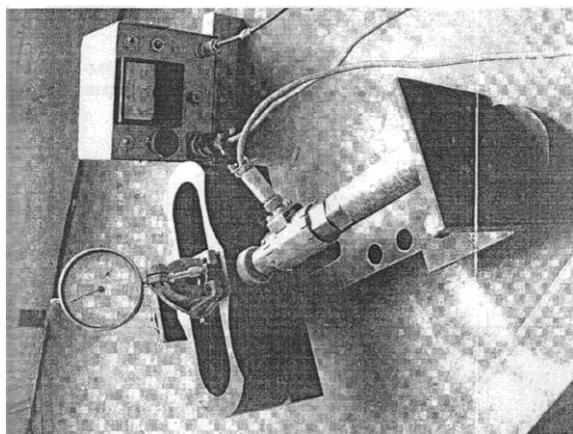


Рис. 4. Общий вид тарировочной системы (динамометра, контрольно-измерительного прибора и датчика-толкателя) для проведения ударно-усталостного деформирования балки с боковым концентратором консольным изгибом

Fig. 4. General view of the calibration of the system (dynamometer test instrument and sensor-pusher) for shock fatigue deformation of beams with lateral cantilever bending Hub

В процессе экспериментов фиксировали суммарное количество циклов $N_{цикл}$ на зарождение и распространение трещины в тело балок с помощью счетчика установки, а длину инициированной трещины l устанавливали по объективу катетометра КТМ-8-630, наведенному в острие дна концентратора со стороны боковой грани балки.

Полученные результаты для двух режимов ударно-усталостного консольного деформирования балочных образцов с боковым концентратором сведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, максимальную ударно-усталостную прочность $N_{цикл}$ имеет 30ХГСА независимо от режима деформирования балки с боковым концентратором, промежуточную – 65Г и минимальную - 60С2А. Что касается ударно-усталостной прочности серого и высокопрочного чугунов, то предпочтение следует отдать высокопрочному чугуну ВЧ50-2 по сравнению с серым СЧ20, незави-

симо от того, что они имеют практически одинаковую твердость (табл. 2).

Ударно-усталостную трещиностойкость K_{Ifc} по схеме консольного изгиба балочных образцов с боковым концентратором ($p \leq 0,1$ мм) для исследуемых материалов после термического упрочнения (табл. 1) и деформированных при фиксированном прогибе $f=2$ мм подсчитывали по формулам [39]:

$$K_{Ifc} = \frac{E_f}{\sqrt{f}} F(\varepsilon, \varepsilon_1), \quad (10)$$

$$\text{где: } F(\varepsilon, \varepsilon_1) = \frac{5147\sqrt{\varepsilon} \left[\sqrt{\frac{1}{(1-\varepsilon)^2} - 1} + \sqrt{2,589\varepsilon_1} \right]^{-2}}{\varepsilon_1 (1-\varepsilon)^{3/2} \sqrt{1+7,9927\varepsilon}}$$

Здесь $E = 2,1 \cdot 10^6$ МПа и $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; E – модуль упругости стали и чугуна соответственно; $\varepsilon_1 = L/h = 85/35 = 2,3$ (L – длина балки от точки приложения силы изгиба на консоли к месту концентратора, h – высота балочного образца); $F(\varepsilon, \varepsilon_1)$ – безразмерная функция, учитывающая зависимость прогиба f от параметров ($\varepsilon, \varepsilon_1$). Относительный размер трещины ε находился в пределах от $\varepsilon = l/h = 10,4/35 = 0,29$ до $\varepsilon = l/h = 11,5/35 = 0,32$ (l – длина исходной трещины в балочном образце).

Значения K_{Ifc} для исследуемых сталей и чугунов, подсчитанные по (10, 11) сведены в табл. 3, которые характеризуют средние значения K_{Ifc} после испытаний 3-х образцов для каждой партии исследуемых материалов.

Как видно из данных табл. 3, максимальную ударно-усталостную трещиностойкость K_{Ifc} имеет 30ХГСА, несколько меньше - 65Г и минимальную - 60С2А, что можно объяснить различными физико-механическими свойствами (σ_v, HRC) этих сталей, а также высокой склонностью к хрупкому разрушению 60С2А, связанными со структурными изменениями для заданных режимов термического упрочнения после среднего отпуска.

Значение ударно-усталостной трещиностойкости K_{Ifc} для серого чугуна СЧ20 с высоким содержанием пластинчатого графита меньше, чем у высокопрочного чугуна ВЧ50-2 (табл. 3). Высокая ударно-усталостная трещиностойкость ВЧ50-2 объясняется модифицированием магнием с добавками кремния, а также повышенным содержанием феррита и перлита в его структуре.

Таблица 2. Ударно-усталостная прочность чугунов и сталей

Table 2. Shock-fatigue strength cast irons and steels

№ п/п	Марки материалов	Прогиб на консоли балки f , мм	Твердость балок		Количество циклов деформирования балки, $N_{цикл}$	Глубина образовавшейся трещины в балке l , мм
			HB	HRC		
1	СЧ20	0,6	210		289	12,8
		0,3				
2	ВЧ50-2	0,6	220		1075	12,4
		0,3				
3	60С2А	2,0		52	1450	19,9
		1,0				
4	65Г	2,0		46	3620	17,7
		1,0				
5	30ХГСА	2,0		40	4080	11,7
		1,0				

Таблица 3. Ударно-усталостная и статическая трещиностойкость чугунов и сталей.
Table 3. Shock-fatigue and static fracture toughness of cast irons and steels.

№ п/п	Марки материалов	Прогиб на консоли балки f , мм	Относительные параметры балок		Трещиностойкость, МПа $\sqrt{м}$	
			$\varepsilon = l/h$	$\varepsilon_1 = L/h$	K_{Ifc}	K_{Ic}
1	СЧ20	0,6	0,31	2,3	8,8	10,8
2	ВЧ50-2	0,6	0,31	2,3	12,6	13,9
3	60С2А	2,0	0,31	2,3	38,7	45,4
4	65Г	2,0	0,32	2,3	50,8	57,2
5	30ХГСА	2,0	0,29	2,3	79,2	84,5

Макроизломы образцов сталей 60С2А и 65Г после конечного статического разрушения свидетельствуют о хрупком разрушении, а образцов из стали 30ХГСА о квазихрупком разрушении (рис. 5, а, б, в) соответственно.

Макроизломы чугунных образцов после конечного статического разрушения свидетельствуют только о хрупком разрушении, причем с имеющейся большей зернистостью в серого СЧ20, чем у высокопрочного ВЧ50-2 (рис. 5, з, д) соответственно.

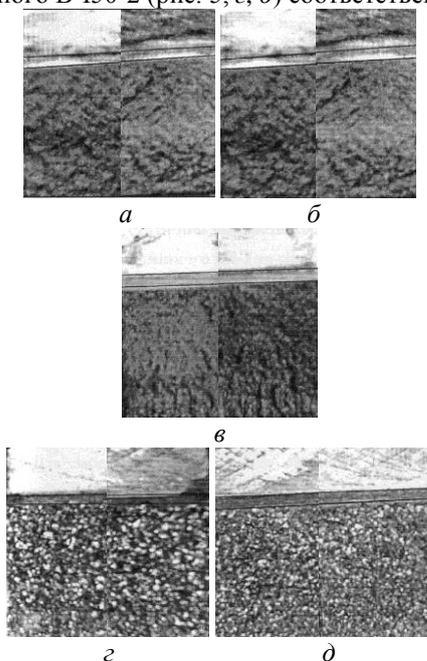


Рис. 5. Макроизломы балочных образцов после ударно-усталостного и конечного статического разрушения: а – 30ХГСА; б – 65Г; в – 60С2А; з – СЧ20; д – ВЧ50-2

Fig. 5. Makroizlomly beam samples after shock fatigue and ultimate static destruction: а – 30ХГСА; б – 65Г; в – 60С2А; з – СЧ20; д – ВЧ50-2

Образец-балку (рис. 2) устанавливали в специальное устройство для реализации чистого трехточечного изгиба, базируя его на роликовые опоры так, чтобы центральный роликовый нож был размещен по середине его длины с противоположной стороны от концентратора – трещины (рис. 6).

Для обеспечения устойчивости балки при статической нагрузке сосредоточенным изгибом на одном конце устройства к бокам опоры прикрепляли две планки, которые в зависимости от высоты и толщины балки регулировали вручную.

Перед началом проведения экспериментов выполнили тарирование деформирующего ножа динамометром силы, который устанавливали под ролик ножа и к шарик, опирающемуся на поверхности балки в плоскости боковой трещины. Прогиб балки от поперечной силы изгиба измеряли индикатором часового типа, закрепленным в устройстве так, чтобы его ножка касалась поверхности балки с противоположной стороны.

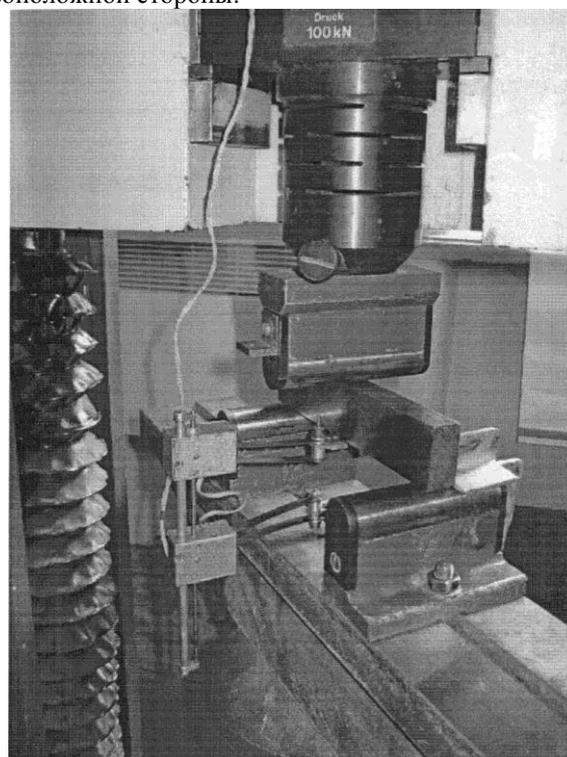


Рис. 6. Общий вид базирующего устройства трехточечным изгибом для балочного образца с боковой трещиной

Fig. 6. The general view is based device for three-point bending beam specimen with lateral crack

Статический трехточечный изгиб балочных образцов с боковой трещиной выполнили на разрывной машине «Инстрон» со скоростью перемещения ее траверсы и ходового винта при деформировании $V = 1,0$ мм/мин.

В результате на экране осциллографа (С1-86) записывали диаграмму разрушения в координатах $(P - f)$, где P – разрушающее усилие изгиба балки; f – прогиб до разрушения балки.

Статическую трещиностойкость K_{Ic} по схеме

трехточечного изгиба балочных образцов с боковой трещиной (рис. 6) для исследуемых материалов подсчитывали по формуле [39]:

$$K_{Ic} = \frac{11,9274P \frac{L}{2} \sqrt{\varepsilon}}{bh\sqrt{h(1-\varepsilon)} \frac{3}{2} \sqrt{1+7,9927\varepsilon}}, \quad (11)$$

где: P – разрушающее усилие изгиба, приложенное по середине балки; h , b – высота и толщина балки соответственно; $L/2$ – половина длины балки до места приложения усилия изгиба; $\varepsilon=l/h$ – относительный размер боковой трещины в балочном образце; l – длина боковой трещины вместе с глубиной концентратора.

Значения K_{Ic} , посчитанные по формуле (10) после разрушения балочных образцов с боковой трещиной по схеме трехточечного изгиба для исследуемых материалов, сведены в табл. 3.

Как видно из сравнения (табл. 3) значения K_{Ic} для сталей 30ХГСА, 65Г, 60С2А и чугунов ВЧ50-2 и СЧ20 распределились в аналогичной последовательности со значениями K_{Ijc} . Меньшие значения K_{Ijc} от K_{Ic} независимо от марок исследуемых материалов можно объяснить жестким ударно-усталостным консольным изгибом балки, защемленной вблизи боковой трещины по сравнению с мягким статическим трехточечным изгибом этой балки. На уменьшение значений K_{Ijc} по сравнению с K_{Ic} влияет также жесткое защемление балки в приспособлении вблизи концентратора. Можно полагать, что возникшие напряжения от такого защемления накладываются на напряжения от ударно-усталостного деформирования, которые совместно облегчают процесс зарождения и распространения боковой трещины в материале образца.

Для доказательства изложенного, на двух образцах с трещинами после двух видов деформирования провели подготовительные работы по изготовлению шлифов для дальнейших микроструктурных исследований. В результате, пластически деформированные полосы (изоклины) выявили на микроскопе МИМ-8 после травления шлифов 4-х %ным раствором пикриновой кислоты, нанесенной в окле вершины трещины со стороны боковой поверхности балок.

Таким образом было доказано, что ударно-усталостное деформирование образца-балки консольным изгибом способствует формированию меньших размеров пластических полос (изоклины) впереди фронта трещины по сравнению со статическим изгибом аналогичного образца (рис. 7 а, б), что также подтверждают полученные значения K_{Ic} и K_{Ijc} , например, для стали 30ХГСА.

Необходимо также отметить, что приведенные результаты исследований по K_{Ic} и K_{Ijc} коррелируют с данными [40], установленными для аналогичных термоупрочненных материалов, что еще раз подтверждает эффективность применения разработанных методик для оценки конструкционных материалов с позиции трещиностойкости, т.е. тогда, когда они ослаблены дефектами типа трещин.

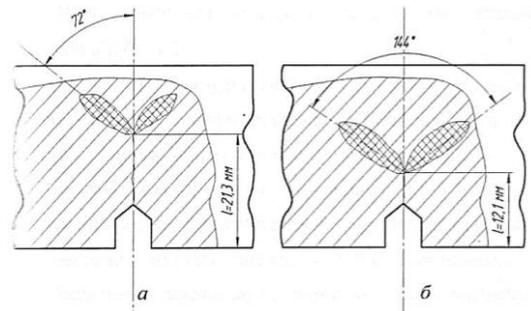


Рис. 7. Формы и размеры пластических полос после ударно-усталостного консольного изгиба (а) и статического трехточечного изгиба (б) балочных образцов с боковой трещиной для стали 30ХГСА.

Fig. 7. The shapes and sizes of plastic strips after shock fatigue cantilever bend (a) and static three-point bending (b) of beam patterns with lateral crack 30ХГСА for steel

ВЫВОДЫ

1. Разработаны инженерные методики и соответствующие устройства, приспособленная, контрольно-измерительные устройства для определения ударно-усталостной прочности $N_{цикл}$, ударно-усталостной K_{Ijc} и статической K_{Ic} трещиностойкости пружинных сталей 60С2А, 65Г и конструкционной легированной стали 30ХГСА, а также серого СЧ20 и высокопрочного ВЧ50-2 чугунов на балочных образцах, защемленных вблизи бокового концентратора и деформируемых ударно-усталостным консольным изгибом на специальной восьмиместной установке.

2. Установлено количественное ранжирование перечисленных материалов, которое выразилось максимальными значениями $N_{цикл}$, K_{Ijc} и K_{Ic} для стали 30ХГСА, средними – 65Г и минимальными – 60С2А. Большими значениями $N_{цикл}$, K_{Ijc} и K_{Ic} обладает также высокопрочный чугун ВЧ50-2 по сравнению с серым чугуном СЧ20.

3. На примере стали 30ХГСА показано, что форму и размеры полос пластичности на продолжении исходной трещины можно выявлять на инструментальном микроскопе путем травления шлифов 4%-ным раствором пикриновой кислоты, нанесенным в окле вершины трещины со стороны боковой поверхности балочного образца, которые качественно подтверждают полученное большее значение трещиностойкости K_{Ic} по сравнению с значением K_{Ijc} соответственно.

4. Из анализа разрушений балочных образцов с трещинами, а также результатов трещиностойкости ($N_{цикл}$, K_{Ijc} и K_{Ic}) для исследуемых материалов установлено, что наиболее склонными к хрупкому разрушению есть пружинная сталь 60С2А и серый чугун СЧ20. Следовательно, для изготовления ответственных деталей техники, работающих в жестких ударно-усталостных и статических нагрузениях, нужно рекомендовать из исследуемых сталей – термически упрочненную сталь 30ХГСА (нагрев от 1225К, охлаждение в масле и отпуск при 773К в течении 2ч.); из исследуемых чугунов – термически упрочненный высокопрочный чугун ВЧ50-2 (нагрев от 1173К, отжиг при 773К в течении 6 ч., охлажде-

ние с печью до 473К и последующие охлаждение на воздухе).

5. Несмотря на успехи развития механики разрушения конструкционных материалов, которая превратилась в самостоятельный раздел механики деформируемого твердого тела (см. литературный обзор), их несущая способность с точки зрения повреждаемости и разрушений будут зависеть от различных факторов: режимов и способов деформирования исследуемого образца (жёсткого, мягкого), марки самого материала, его качества (режимов термообработки и структурного состояния), а поэтому для практики их нужно учитывать в комплексе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Когут Н.С. 2008.** Трещиностойкость конструкционных материалов и их сварных соединений с наплавками / Н.С. Когут, Н.Н. Лебидь. – Львов: Арал. – 287. (Украина).
2. **Махненко В. И. 1982.** Применение критериев механики разрушения к расчету на прочность сварных соединений с предусмотренными несплошностями трещиноподобного типа / В.И. Махненко, В. Е. Починок // Автоматическая сварка. – № 1. – 1 – 6.
3. **Когут Н.С. 2012.** Определение трещиностойкости (K_{Ic}) металла шва стальной термонапряженной арматуры на цилиндрическом образце с кольцевой трещиной / Н.С. Когут, Р.В. Гуменюк // MOTROL. Commission of Motorisation and energetics in agriculture. – Vol. 14, №4. – 28-31. (Украина).
4. **Когут Н.С. 2003.** Оценка прочности стыковых сварных соединений из стали 50 по критериям трещиностойкости [Н.С. Когут, В.С. Караим, Н.Н. Лебидь, О.И. Панько] // Проблемы прочности. – № 2. – 147–155.
5. **Когут Н.С. 2014.** Влияние технологических факторов на изменения трещиностойкости термонапряженной арматуры / Н.С. Когут, Р.В. Гуменюк // MOTROL. Commission of Motorisation and energetics in agriculture. – Vol. 16, №4. – 189-192.
6. **Серенсен С.В. 1975.** Критическое раскрытие трещины при квазихрупком и хрупком разрушении [С.В. Серенсен, В.С. Гиренко, В.И. Дейнега] // Автоматическая сварка. – № 2. – 1-6.
7. **Kohut M.S. 1993.** Fracture toughness of structural materials and their weld joints / M.S. Kohut, V.A. Shabairovych // Fracture mechanics successes and problems. Collection of Abstracts. Part II. ICF-. Kiev. – 603-604.
8. **Николс Р. 1972.** Оценка сопротивления материалов разрушению по критическому раскрытию трещин / Р. Николс. – Новые методы оценки сопротивления материалов хрупкому разрушению. – М.: Мир, – 11 - 18.
9. **Панасюк В.В. 1975.** К теории определения критического раскрытия трещины / В.В. Панасюк, А. Е. Андрейкив. – Механика деформируемых тел и конструкций. – М.: Машиностроение. – 373 - 378.
10. **Панасюк В.В. 1990.** Определение величины раскрытия вершины трещины в упругопластических телах / В.В. Панасюк, А.Е. Андрейкив, М.М. Стадних // Физико-химическая механика материалов. – № 6. – 53-61. (Украина).
11. **Писаренко Г.С. 1982.** Экспериментальные методы в механике разрушения материалов / Г.С. Писаренко, В.П. Науменко // Физико-химическая механика материалов. – № 2. – 28 - 41.
12. **Писаренко Г.С. 1986.** Экспериментальные методы в механике деформируемого твердого тела / Г.С. Писаренко, В.А. Стрижало – К.: Наукова думка. – 264.
13. **Пустовой В.Н. 1992.** Исследование работоспособности элементов конструкций в рамках КРТ-критерия / В.Н. Пустовой // Физико-химическая механика материалов. – № 3. – 111-112.
14. **Ильин А.В. 1992.** Метод определения критического значения J-интеграла в условиях стабильного роста трещин / А.В. Ильин, Ю.А. Никонов, Д.В. Прохоров // Проблемы прочности. – № 3. – 18 - 25.
15. **Нешпор Г.С. 1986.** Применение R-кривой для оценки вязкого разрушения / Г.С. Нешпор, Г.Д. Кудрявцева // Заводская лаборатория. – № 4. – 55 - 58.
16. **Писаренко Г.С. 1978.** Определение трещиностойкости материалов на основе энергетического контурного интеграла / Г.С. Писаренко, В.П. Науменко, Г.С. Волков. – К.: Наукова думка. – 123.
17. **Смоленцев В.И. 1979.** Метод определения J-интеграла и его составляющих / В.И. Смоленцев // Заводская лаборатория. – № 1. – 73 - 76.
18. **Begley J.A. 1977.** The J-integral as a fracture criterion / J.A. Begley, I.D. Landes. – Fracture Toughness // ASTM STP 514. – 1 - 23.
19. **Черепанов Г.П. 1974.** Механика хрупкого разрушения / Г.П. Черепанов. – М.: Наука, – 640.
20. **Черепанов Г.П. 1987.** Современные проблемы механики разрушения / Г.П. Черепанов // Проблемы прочности. – № 8. – 3 - 13.
21. **Rice J. R. 1968.** A path independent integral and the approximate allusion of strain concentration by notches and cracks / J.R. Rice // J. Appl. Mech., Ser. E. – No. 35. – 287 - 298.
22. **Rice J. R. 1973.** Some further results of J-integral analysis and progress in flow growth and fracture toughness testing / J.R. Rice, P.C. Paris, J.G. Merkle // ASTM STP 536. – 231 - 245.
23. **Георгиев М.Н. 1980.** О достоверности определения K_{Ic} с помощью J-интеграла / М.Н. Георгиев, Е.М. Морозов // Заводская лаборатория. – № 3. – 273 - 277.
24. **Маркочев В.М. 1978.** Работа разрушения и работа пластической деформации в испытаниях на вязкость разрушения / В.М. Маркочев, Е.М. Морозов // Физико-химическая механика материалов. – № 6. – 71 - 74.

25. **Романив О. Н. 1978.** Использование метода J-интеграла для оценки трещиностойкости конструкционных материалов / О.Н. Романив, Г.Н. Никифорчин // Физико-химическая механика материалов. - № 3. - 80 - 95.
26. ISME 5.001-1981. Method of Elastic-Plastic Fracture Toughness Testing J_{Ic} . Japanese Society for Mechanical Engineers, 1981. - 15.
27. Standard Test Method for J_{Ic} . A Measure of Fracture Toughness // ASNI/ ASTM E. - 1981. - No. 813. - 10.
28. SINTAP defect assessment procedure for strength mis-matched structures // Eng. Fract. Mech. - 2000. - 67, No. 6. - 529 - 546.
29. The engineering treatment model // Int. J. Press. Vess. Piping. - 2000. - 77. 905 - 981.
30. Fracture mechanics analysis of the BIMET welded pipe tests // Ibid. - 2004. No 81. - 251 - 277.
31. **Когут Н.С. 1999.** Определение трещиностойкости сварных соединений многократным испытанием призматического образца с боковой трещиной / Н.С. Когут // Вестник НУ "Львовская политехника" "Оптимизация производственных процессов и технический контроль в машиностроении и приборостроении". - Вып. № 371. - 79 - 82. (Украина).
32. **Лебедь Н.Н. 1999.** Оценка трещиностойкости сварных соединений из квазихрупких и вязких материалов по критерию критического раскрытия трещины / Н.Н. Лебедь, К.Н. Русинко // Вестник НУ "Львовская политехника" "Оптимизация производственных процессов и технический контроль в машиностроении и приборостроении". - Вып. № 371. - 65 - 71. (Украина).
33. **Панасюк В.В. 1977.** Методы оценки трещиностойкости конструкционных материалов / В.В. Панасюк, А.Е. Андрейкив, С.Е. Ковчик. - К.: Наукова думка. - 276.
34. **Панасюк В.В. 1991.** Механика квазихрупкого разрушения материалов / В.В. Панасюк. - К.: Наукова думка. - 415.
35. ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. - М.: Изд-во стандартов, 1985. - 61.
36. **Когут Н.С. 1986.** Трещиностойкость конструкционных материалов / Н.С. Когут // - Львов: Вища школа. - 160.
37. **Андрейкив А.Е. 1982.** Пространственные задачи теории трещин / А.Е. Андрейкив // - К.: Наукова думка. - 348.
38. **Караим В.С. 2001.** Установка для ударно-усталостных испытаний балочных образцов изгибом на консоли / В.С. Караим, Н.С. Когут // Вестник НУ «Львовская политехника»: Оптимизация производственных процессов и технический контроль в машиностроении и приборостроении. - Вып. № 422. - 56-61. (Украина).
39. **Панько И.Н. 2000.** Теоретические основы инженерных методов для оценки трещиностойкости материалов и инженерных конструкций / И.Н. Панько. - Львов, Издательский центр Львовского национального университета имени Ивана Франко. - 279. (Украина).
40. **Буртак В.В. 2012.** Обоснование параметров рабочих элементов и выбор материалов по трещиностойкости для зерновых дробилок ударно-перетирающего действия / В.В. Буртак // Автореферат дис. канд. техн. наук. - Львов: Львовский национальный аграрный университет. - 20. (Украина).

THE SHOCK-FATIGUE AND STATIC CRACK RESISTANCE OF METAL CONSTRUCTION MATERIALS AND THE CRACK TIP PLASTICITY STRIPS

Summary. Described are the engineering methods for determining the shock-fatigue strength N_{sikl} , shock-fatigue K_{Ifc} and static K_{Ic} crack resistance of thermally strengthened spring steel 60C2A, 65Г, and structural steel alloy 30ХГСА, as well as gray СЧ20 and high-duty ВЧ50-2 cast iron on specimens jammed near the side hub of beam specimens which underwent deformation by the shock-fatigue console bending using special multi-unit installation equipment.

Established results of the fatigue strength $N_{цикл}$, shock-fatigue K_{Ifc} and static K_{Ic} crack resistance showed the highest values for steel 30ХГСА, then next - steel 65Г и 60C2A, and lowest – cast iron ВЧ50-2 and СЧ20.

Their values are qualitatively confirmed by plastic deformation bands (isoclines) on the extension of the initial cracks, mounted on the tool microscope which qualitatively confirm obtained higher values of fracture toughness compared to K_{Ic} K_{Ifc} respectively.

From the analysis of the destruction beam specimens with cracks, as well as the results of fracture toughness (N_{sikl} , K_{Ifc} and K_{Ic}) for study materials found to be the most prone to brittle fracture has 60C2A spring steel and cast iron СЧ20. Consequently, for the manufacture of critical parts of equipment operating in hard shock fatigue and static loading should be encouraged from the studied steels - heat-hardened steel 30ХГСА (heating from 1225K, cooling in oil and tempering at 773K during 2 hours.); of the studied iron – heat-strengthened ductile iron ВЧ50-2 (heating from 1173K, annealing at 773K during 6 hrs., Furnace cooling to 473K and subsequent air cooling).

Despite the progress of fracture mechanics of construction materials, which has become an independent branch of solid mechanics (see. Literary Review), their carrying capacity in terms of damage and destruction will depend on various factors, modes and methods of deformation of the test sample (hard , soft), the brand of the material, its quality (heat treatment regimes and structural state), and therefore the practice they need to be taken into account in the complex.

Key words: beam, fatigue resistance, shock-fatigue and static crack resistance, profile of the diffraction line, bending stress, plastic strips, lateral fissure.