

промышленности: сб. науч. тр. / НИИТЭХИМ. – Москва, 1968. – вып.3. – С.3. 2. Василевич, Ю.В. Функциональные зависимости для сил внутреннего трения при деформации препрегов / Ю.В. Василевич, В.М.Сахоненко, С.В.Сахоненко, К.А.Горелый, Е.В.Малютин // Механика машин, механизмов и материалов. – 2011. – №3 (16). – С. 31-33. 3. Крагельский И.В. Трение и износ / И.В.Крагельский. – М.: Машиностроение, 1962. – 370 с. 4. Крагельский И.В. Развитие науки о трении / И.В.Крагельский, В.С.Щедров. – М.: изд. АН СССР, 1956. 5. Крагельский И.В. Трение волокнистых веществ / И.В.Крагельский. – М.: Гизлегпром, 1941. 6. Дерягин Б.В. Физико-химия нанесения тонких слоев на движущуюся подложку / Б.В.Дерягин, С.М.Левин. – М.: изд. АН СССР, 1959. – 391 с.

УДК 539:374.002.62

Василевич Ю.В., Сахоненко В.М., Сахоненко С.В.,

Горелый К.А., Малютин Е.В.

ОЦЕНКА ПОДАТЛИВОСТИ ПРЕПРЕГОВ ПРИ СЖАТИИ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Представлена модель деформации препрегов из гладких и мультиаксиальных тканей. Для них установлены функциональные зависимости для определения величины деформации при сжатии каждого из семейств нитей. Установлены характеристики в виде неупругой постоянной сжатия и модуля упругости при сжатии. Разработаны методики определения этих характеристик. Для ткани Т-13 проведены соответствующие испытания и найдены значения указанных характеристик.

Развитие промышленного производства композитов невозможно без широкого внедрения технологии изготовления изделий из полуфабрикатов, в частности, препрегов. При этом к препрегам предъявляются дополнительные требования технологического характера, основными из которых являются гибкость и податливость. В результате уже сформированное изделие может приобрести новые формы с изменением размеров. Такое обстоятельство открывает перед технологами неограниченные возможности, позволяющие в некоторых случаях упростить оснастку, уменьшить период изготовления изделия, повысить его качество и прочностные свойства. Создание композита тесно связано с проблемой его расчета и поэтому, чтобы гетерогенная система могла рассматриваться как сплошная анизотропная среда с некоторым тензором привязанных вязкоупругих характеристик, необходимо установить методы оценки величины этих характеристик.

Будем иметь дело с многослойными препрегами, состоящими из нескольких слоев гладких тканей [1] или из мультиаксиальных тканей [2]. Для таких препрегов внешняя нагрузка может создавать условия для возникновения растягивающих напряжений в нитях, усилий сжатия нитей в поперечном к ним направлении, взаимного смещения нитей одного семейства по нитям второго семейства.

Отметим, что сжатие у препрегов может быть двойкой формы. Очевидно, сжатие в обычном смысле приводит к потере устойчивости армирующего материала каркаса ткани, так как он представляет собой абсолютно гибкие нити, которые могут воспринимать только растягивающие нагрузки. Сжатие без потери устойчивости может быть осуществлено только совместно с растяжением второго семейства нитей. Простейший случай такого сжатия получается при параллельном сдвиге одного семейства нитей вдоль второго. При таком сжатии сжимающие усилия передаются от одной нити к другой только при непосредственном контакте между нитями разных семейств в узлах переплетения. При этом вначале сечение нити, состоящее из 1000 и более элементарных нитей, доуплотняется даже при незначительной по величине силе. В результате происходит сдвиг между семействами нитей. Дальнейшее увеличение усилий сжатия сопровождается упругими деформациями.

Задачей настоящего исследования является установление функциональной зависимости для определения величины деформации при сжатии препрегов, а также определение характеристик препрега, которые используются в расчетных формулах.

Для моделирования процессов, происходящих при сжатии препрегов, проводились испытания плоских образцов, изготовленных из тканого материала. Приспособление для испытаний представляет

собой четырехзвенник в виде квадрата [3, 4] (рис. 1). Образец ткани в общем случае в виде ромба и, в частности, в виде квадрата со сторонами, параллельными семействам нитей, защемляется по двум противоположным сторонам четырехзвенника. Две другие стороны образца остаются свободными. Растягивающая нагрузка прикладывается к противоположным углам четырехзвенника. При испытаниях образец удлиняется в направлении действия силы и укорачивается в перпендикулярном направлении, оставаясь все время ромбом. В результате уменьшается расстояние между параллельными сторонами четырехзвенника. Такое обстоятельство приводит к поперечному сжатию нитей основы и утка.

Если в приспособлении защемлены нити основы, то при их сжатии само сжатие осуществляется следующим образом. Происходит параллельный сдвиг нитей, уменьшая расстояние между ними. Изменяются геометрические параметры сечения нитей за счет доуплотнения, пока не обеспечивается ее целостность до установления размеров, не зависящих от величины приложенной внешней нагрузки.

Эти изменения происходят при небольшой по величине нагрузке. Дальнейшее сжатие характеризуется только упругими деформациями. Таким образом, процесс сжатия можно разбить на два этапа: неупругое сжатие и упругое сжатие. Такое представление о сжатии имеет важное практическое значение. Дело в том, что если при переработке препрегов достигнуты условия, при которых имеют место упругие сжатия, то это может привести к потере устойчивости армирующего материала. В результате

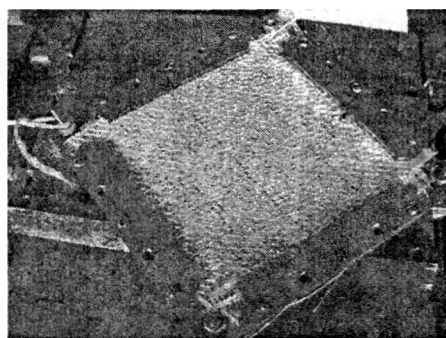


Рис. 1 – Приспособление для испытаний

произойдут значительные геометрические изменения, которые могут привести к складкам, заломам и расслоениям в материале готового изделия, что недопустимо. На этом основании переработка препрегов должна осуществляться в пределах неупругих деформаций. Отсюда вытекает необходимость знания максимального значения неупругих деформаций для каждого семейства нитей у препрегов.

У второго семейства концы нитей не закреплены, поэтому при деформации они могут свободно перемещаться. При сжатии такое свободное перемещение позволяет увеличить долю неупругого сжатия, так как в этом случае появляется возможность неупруго изменить сечение нити, уменьшая ширину сечения за счет увеличения ее толщины.

Проведенные исследования позволяют сделать следующий вывод. При испытаниях образцов ткани с использованием приспособления в виде четырехзвенника упругая стадия сжатия первоначально наступает у семейства нитей, концы которых защемяны. Второе семейство нитей в это время испытывает только неупругие деформации сжатия и поэтому практически деформационное поведение образца ткани может быть описано деформациями сжатия первого семейства. При этом первое семейство берет на себя значительную часть внешней нагрузки, расходуя ее на упругое сжатие.

Пусть вырезан квадратный образец со стороной l , у которого стороны параллельны соответствующим семействам нитей. При испытаниях фиксируется усилие P , приложенное к рамке четырехзвенника и перемещение ΔW , которое равносильно изменению длины диагонали образца.

Представление сжатия тканых материалов, состоящего из двух фаз неупругой и упругой, позволяет предположить линейную зависимость перемещения ΔW от нагрузки P [5]. Таким образом

$$\Delta W = \gamma + \gamma_1 P, \quad (1)$$

где γ и γ_1 - некоторые постоянные, причем величина γ представляет собой неупругую составляющую перемещения. Найдем их методом наименьших квадратов с использованием результатов проведенных испытаний.

Формула (1) может быть представлена в таком виде

$$\gamma + \gamma_1 - \Delta W = 0. \quad (2)$$

Точки $(P_i, \Delta W_{ij})$ представляют собой результаты проведенных испытаний и поэтому они приближенно лежат на прямой, следовательно формулы (1) и (2) приближенные. Подставляя в формулу (2) вместо P и ΔW их значения P_i и ΔW_{ij} , взятые из таблицы результатов испытаний, получим равенства

$$\gamma + \gamma_1 P_i - \Delta W_{ij} = \varepsilon_{ij}, \quad (i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n),$$

где m - количество используемых образцов экспериментов; n - количество нагружений образца; ε_{ij} - некоторые числа, вообще говоря, не равные нулю, которые имеют смысл погрешностей.

Требуется подобрать коэффициенты γ и γ_1 таким образом, чтобы эти погрешности были по возможности малыми по абсолютной величине. Для этого необходимо отыскать минимальное значение функционала

$$U = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\gamma + \gamma_1 P_i - \Delta W_{ij})^2$$

Итак, функцию U можно рассматривать как функцию от двух переменных γ и γ_1 . Подберем эти переменные так, чтобы функция U получила возможно меньшее значение. Для этого необходимо, чтобы соблюдались следующие условия

$$\frac{\partial U}{\partial \gamma} = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial \gamma_1} = 0.$$

Отсюда, удовлетворяя предыдущие зависимости, получим линейную систему двух уравнений с двумя неизвестными γ и γ_1

$$\begin{aligned} m \cdot n \cdot \gamma + \left(n \cdot \sum_{i=1}^m P_i \right) \gamma_1 &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \Delta W_{ij}, \\ \left(n \cdot \sum_{i=1}^m P_i \right) \gamma + \left(n \cdot \sum_{j=1}^n P_i \right) \gamma_1 &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_i \Delta W_{ij}. \end{aligned} \quad (3)$$

Это окончательный вид так называемой нормальной системы способа наименьших квадратов. Из этой системы находим γ и γ_1 , а затем подставляем их в эмпирическую формулу (1).

Результаты испытаний для ткани Т-13 представлены в таблице 1. Здесь в таблице первая строка данных относится к случаю, когда в приспособлении защемлены нити основы, вторая строка данных – защемлены нити утка, третья строка – все концы нитей защемлены.

Таблица 1– Результаты испытаний образцов ткани Т-13 на сжатие

	P_i, H												
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	100	150	250
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.
$\Delta W_{ij}, \text{мм}$	23	50	63	65	71	74	74	75	75	75	80	81	83
	34	58	73	77	82	83	87	88	89	90	94	95	97
	25	54	60	64	67	70	71	73	74	74	81	83	86
	26	55	68	76	79	80	82	84	85	85	90	91	92
	29	65	74	83	84	88	90	90	93	93	96	96	97
	31	61	63	68	70	73	74	75	76	77	82	85	87
	28	56	70	73	76	79	81	81	81	82	87	89	90
	31	66	78	82	86	88	90	90	91	91	96	97	98
	30	55	60	62	66	67	69	72	76	77	84	89	92

Окончание таблицы 1

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.
	27	55	62	72	75	76	78	79	80	80	85	88	90
	30	73	76	79	84	85	90	90	91	91	95	95	98
	29	60	66	70	73	74	77	77	78	79	85	88	90
	26	50	61	65	66	68	71	72	73	73	79	82	84
	30	63	77	82	85	87	88	89	90	91	95	97	98
	30	54	64	67	73	75	78	78	81	81	90	94	97
	26	58	65	73	86	88	89	89	90	90	94	95	96
	29	64	70	70	84	86	86	88	89	92	94	96	96
	26	50	64	70	73	75	76	78	78	79	80	81	85
	27	59	71	76	79	81	82	83	84	85	89	90	91
	28	66	69	75	83	84	86	87	88	90	92	97	98
	28	54	63	65	69	70	73	74	76	79	82	86	87
	24	54	66	68	70	72	73	76	77	80	82	86	87
	28	55	65	69	71	72	74	75	77	78	85	88	94
	29	58	59	59	60	61	65	70	75	80	83	86	88
	28	52	58	59	60	60	61	61	62	63	71	75	80
	30	58	70	76	80	81	84	85	86	87	92	94	95
	31	65	68	70	72	74	76	77	78	79	84	92	95
	25	52	64	70	78	80	81	83	83	84	85	85	86
	30	61	77	79	81	80	84	85	86	88	90	92	94
	29	55	65	71	73	76	78	80	80	81	86	91	92

Используя данные таблицы 1 из системы (3) найдены величины γ и γ_1 .

В случае заземления нитей основы $\gamma = 63,8 \text{ мм}$; $\gamma_1 = 0,096 \text{ мм/Н}$.

В случае заземления нитей утка $\gamma = 71,6 \text{ мм}$; $\gamma_1 = 0,098 \text{ мм/Н}$.

В случае заземления нитей основы и утка $\gamma = 62,4 \text{ мм}$; $\gamma_1 = 0,110 \text{ мм/Н}$.

Анализ данных таблицы показывает, что результаты испытаний в первом и третьем случаях практически одинаковы в диапазоне нагружения, обеспечивающего неупругое сжатие. Это означает, что в третьем случае при испытаниях, когда нити основы достигли фазы упругого сжатия, то нити утка еще нет. Такое положение доказывает правильность сделанных выше выводов о сжатии, что позволяет найти характеристики сжатия каждого семейства нитей у ткани.

Определим относительное сжатие соответствующего семейства нитей. Для этого воспользуемся схемой деформирования рамы, изображенной на рис. 2.

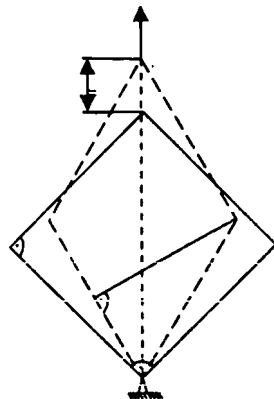


Рис. 2 – Схема деформирования рамы

Здесь на рисунке $AD = AB = C'D' = B'C' = a$. Искомое относительное сжатие ϵ равно

$$\epsilon = \frac{AD - ED'}{AD}.$$

Запишем теорему косинусов для треугольника $AD'C'$

$$(AC'')^2 = (C'D')^2 - 2C'D' \cdot AD' \cdot \cos \angle AD'C'.$$

Если обозначим $\angle B'AD'$ через β , то получим

$$(\sqrt{2}a + \Delta W)^2 = a^2 + a^2 + 2a^2 \cos \beta.$$

С учетом того, что $EA = a \cos \beta$, найдем

$$EA = \frac{(\sqrt{2}a + \Delta W)^2 - 2a^2}{2a} = \sqrt{2}\Delta W + \frac{\Delta W}{2a}. \quad (4)$$

Считаем слагаемое

$$\frac{\gamma_1 P^2}{2a}$$

в равенстве (4) малым по сравнению с оставшейся суммой. В таком случае выражение для EA приобретает вид

$$EA \approx a(\gamma_{11} + \gamma_{12}P), \quad (5)$$

где

$$\gamma_{11} = \frac{\gamma}{a} \left(\sqrt{2} + \frac{\gamma}{2a} \right), \quad \gamma_{12} = \left(\sqrt{2} + \frac{\gamma}{a} \right).$$

Отметим, что выражение (5) для EA два первых слагаемых в разложении ее функциональной зависимости по степени P . Поступая аналогичным образом при вычислении ED' , найдем

$$\begin{aligned} ED' &= \sqrt{(AVD)^2 - AE^2} \approx \sqrt{1 - \gamma_{11}^2 2\gamma_{11}\gamma_{12}P} \approx \\ &\approx \alpha \sqrt{1 - \gamma_{11}^2} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_{11}\gamma_{12}}{1 - \gamma_{11}^2} \cdot P \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Нагрузка $P = 250H$ является предельной. Это значение при проведении испытаний было выбрано с целью проверки точности полученных формул на всем возможном диапазоне изменения P . Очевидно, что зависимость (6) является точной при $P = 0$. Наибольшая погрешность наблюдается при максимальном значении P . Для ткани Т-13, участвующей в испытаниях, при $a = 180$ мм точное значение $ED' = 101,5$ мм, а приближенное, подсчитанное по формуле (6), равно 80,5 мм. Погрешность вычисления в этом случае составила около 20%.

С учетом того, что переработка препрегов осуществляется при малых значениях нагрузки P , расчеты по формуле (6) являются приемлемыми. Во многих случаях достаточно знать только величину неупругого перемещения, которое в случае малости P практически равно искомому. С учетом найденной зависимости (6) для ED' относительное сжатие ε семейства нитей равно

$$\varepsilon \approx \left(1 - \sqrt{1 - \gamma_{11}^2} \right) + \frac{\gamma_{11}\gamma_{12}}{1 - \gamma_{11}^2} P. \quad (7)$$

Здесь первое слагаемое в равенстве для ε отвечает за неупругую относительную часть сжатия семейства нитей, а второе – за упругую. В таком случае второе слагаемое в равенстве (7) можно представить в виде

$$\frac{\gamma_{11}\gamma_{12}}{1 - \gamma_{11}^2} P = \frac{\sigma_{сж}}{E_{сж}}, \quad (8)$$

где $\sigma_{сж}$ – напряжение сжатия семейства нитей; $E_{сж}$ – модуль упругости при сжатии.

Для нахождения $\sigma_{сж}$ поступим следующим образом. Внешняя нагрузка P уравнивается напряжениями σ_P , которые испытывает образец ткани (условно удаляется образец ткани из приспособления для испытаний и заменяется его действие на четырехзвенник усилиями σ_P). Таким образом, работа силы P равна работе сил сопротивления σ_P . При этом необходимо учесть, что работа на неупругих перемещениях равна нулю. Второе уравнение для определения $\sigma_{сж}$ найдем из условия равенства потенциальной энергии деформации образца ткани работе внешних сил. С учетом того, что упругие деформации сжатия $\sigma_{сж}$ и растяжения σ_P испытывает только семейство нитей, закрепленное по концам в приспособлении для испытаний, получим

$$\frac{1}{2}\gamma_1 P^2 = \frac{1}{2}\sigma_{11} ha \cdot \Delta W_1,$$

$$\frac{1}{2}\gamma_1 P^2 = \frac{1}{2}\sigma_{11} ha \cdot \Delta W_2 + \frac{1}{2}\sigma_{сж} ha \cdot \Delta W_1 \quad (9)$$

$$\Delta W_1 = \frac{\gamma_{11}\gamma_{12}}{1-\gamma_{11}^2} Pa, \quad \Delta W_2 = \frac{\sigma_P}{E_T} a$$

Здесь ΔW_1 – величина упругого сжатия нитей; ΔW_2 – величина упругого растяжения нитей; E_T – модуль упругости при растяжении ткани; h – толщина ткани.

Из системы (9) определим

$$\sigma_{сж} = P \left(\gamma_1 - \frac{\gamma_1^2(1-\gamma_{11}^2)}{ha^2\gamma_{11}^2\gamma_{12}^2 E_T} \right) \frac{\sqrt{1-\gamma_{11}^2}}{ha^2\gamma_{11}\gamma_{12}} \quad (10)$$

Модуль упругости $E_{сж}$ найдем из (8)

$$E_{сж} = \frac{\sqrt{1-\gamma_{11}^2}}{ha^2\gamma_{11}^2\gamma_{12}^2} \left(\gamma_1 - \frac{\gamma_1^2(1-\gamma_{11}^2)}{ha^2 E_T \gamma_{11}^2 \gamma_{12}^2} \right) \quad (11)$$

Для ткани Т-13 толщина составляет $h = 0,26$ мм. Модуль упругости при растяжении ткани в направлении основы равен $3 \cdot 10^4$ Н/мм², а в направлении утка – $2,5 \cdot 10^4$ Н/мм². Расчет, проведенный по формулам (11), с учетом этих данных и результатов испытаний, установил, что $E_{сж} = 17,6$ Н/мм² и $E_{сж} = 15,2$ Н/мм² для семейств нитей основы и утка соответственно. Относительное сжатие семейств нитей при этом составило:

$\epsilon_0 = 0,17$ – для нитей основы;

$\epsilon_0 = 0,23$ – для нитей утка.

Необходимо отметить, что понятие упругого сжатия для препрегов несколько отличается от понятия упругого сжатия твердого тела. Как в первом, так и во втором случаях, деформации тел являются достаточно малыми, а феноменологические соотношения, связывающие деформированное и напряженное состояния, линейны. Однако, если во втором случае тело полностью восстанавливает свою первоначальную форму после снятия нагрузки, то, как показали экспериментальные исследования, в первом случае первоначальная форма не восстанавливается полностью. Такова особенность деформирования препрегов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тканые конструкционные композиты: / Скардино Ф.и др.]; пер. с англ. под ред. Т.- В. Чу и Ф. Ко. – М.: Мир, 1991. – 432 с.
2. Хилиджинов К.В. Мультиаксиальные ткани «Армент» компании «Стеклонит» / Хилиджинов К.В. // Композитный мир. – 2008 (18). – № 5. – С. 10-13.
3. Liu, C.J. Residual stresses in filament wound laminates and optimum programmed winding tension / C.J. Liu, C.C. Chamis // Proc. SPIE, 20 – the Annual Conference, sect. 5-D. – 1965.
4. Качурин В.К. Гибкие нити с малыми стрелками / В.К. Качурин. – Москва: ГИТТЛ. – 1956. – 137 с.
5. Василевич Ю.В. Теоретические и экспериментальные исследования

по определению неупругой составляющей сжатия ткани Т-13 / Василевич Ю.В., Сахоненко В.М., Сахоненко С.В., Горелый К.А, Малютин Е.В.// Механика машин, механизмов и материалов. – 2011. – №4 (17). – С.63–65.

УДК 620.178.7

Василевич Ю.В., Мойсейчик А.Е., Мойсейчик Е.А.

О ВЗАИМОСВЯЗИ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ СТАЛИ С ДЕФОРМАЦИОННЫМ ТЕПЛОБРАЗОВАНИЕМ В НАДРЕЗЕ

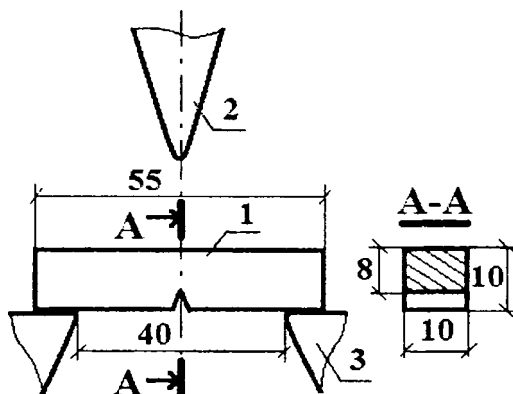
Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

В статье отмечаются недостатки существующей методики определения ударной вязкости при низких температурах по ГОСТ 9454-78. Указывается, что при таких испытаниях лишь качественно регламентируется продолжительность установки охлажденного образца в копер, при отсутствии точных замеров температуры образца в момент удара маятником. Температура образца в этот момент принимается равной температуре охлаждающей среды холодильной камеры. Не учитывается неопределенность вследствие изменения температуры в корне надреза в момент удара из-за вклада деформационного тепла. На основании выполненного анализа делается вывод, что величина экспериментально определяемой ударной вязкости стали зависит не только от ее механических характеристик, но и теплофизических свойств.

Ключевые слова: сталь, ударная вязкость, деформационное тепло

Введение. При выборе и приемосдаточных испытаниях сталей для металлоконструкций их склонность к хрупкому разрушению оценивают по величине ударной вязкости, определяемой в соответствии с ГОСТ 9454-78[1]. Этот способ испытания стали имеет свою историю[2]. Стандартный метод ударных испытаний [1] проявляет комплексное действие на сталь трех факторов: надреза, температуры, скорости приложения нагрузки. Для конструирования конкретных изделий часто необходимо учитывать при ударных испытаниях влияние на сталь и других факторов (толщины элемента, сварочных и др. воздействий) [3]. В соответствии с ГОСТ 9454-78 нагружение испытуемого при данной температуре образца с одним из трех типов надрезов (U,V,T) производят по схеме рис. 1.



1-стандартный образец с надрезом типа U,V,T; 2-нож маятника; 3-опоры копра

Рис. 1 – Схема испытаний образцов на ударную вязкость

При испытаниях с охлаждением ГОСТ 9454-78 лишь качественно регламентирует продолжительность установки охлажденного образца в копер, без точных замеров температуры образца в момент удара маятником копра. При этом температура образца в момент удара принимается равной температуре охлаждающей среды. Дополнительную неопределенность вносит деформационное тепло, возникающее в корне надреза в момент удара. Конкретный тип надреза образца применяется в зависимости от особенностей работы материала в составе конструкции. Так, для строительных металлоконструкций наиболее распространен метод ударных испытаний по Шарпи [4]. При этом нужно