

# Методы определения деформации разрушения листовых высокопрочных сталей в зависимости от скорости деформации

**В. М. Косенков**

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
г. Николаев, 54018, Украина, e-mail: [v.m.kosenkov@gmail.com](mailto:v.m.kosenkov@gmail.com)*

Поступила 22.05.2018

После доработки 20.07.2018

Принята к публикации 23.07.2018

Определена совокупность методов экспериментального исследования влияния скорости деформации листовых высокопрочных сталей (на примере сталей DP780, DP980, ВН240) на увеличение их пластичности в процессе одноосного и двухосного растяжения. Скорости деформации сталей изменяли в широких пределах от  $10^{-4}$  до  $17 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ . Для этого использовали разрывную машину FP 10/1 HESKERT, гидравлический пресс П6324 со специальной оснасткой, установку Гопкинсона-Кольского и электрогидравлический пресс Т1226Б. Деформации разрушения материалов в процессе двухосного растяжения определяли с помощью контрольной сетки на их поверхности. Определены зависимости деформаций разрушения сталей DP780, DP980, ВН240 от скорости деформации и их напряженно-деформированного состояния, показывающие увеличение пластичности стали DP780 до 2,9 раза.

*Ключевые слова:* электрический разряд в воде, скорость деформации, деформация, разрушение, напряженно-деформированное состояние, листовые высокопрочные стали.

УДК 620.1.05:620.171.313

DOI: 10.5281/zenodo.2551221

ВВЕДЕНИЕ

Современные листовые высокопрочные стали DP780, DP980, ВН240 обладают пониженными пластическими свойствами [1, 2], что затрудняет процесс изготовления из них деталей пластическим деформированием [3, 4]. Как правило, они не подлежат термообработке, так как при этом теряют свои прочностные свойства или в еще большей степени уменьшается их пластичность. Устранить эту проблему в значительной степени позволяет использование особенностей поведения металлов в процессе их деформирования с большой скоростью. Во многих исследованиях отмечено положительное влияние большой скорости деформации металлов на увеличение их пластических деформаций без разрушения [3–5]. Причем увеличение пластичности материалов происходит непосредственно в процессе их деформирования и не требует предварительной обработки. Эта особенность поведения металлов при большой скорости деформации связана с переходом их структуры в неравновесное состояние, что облегчает ее перестройку без нарушения связей между элементами при больших деформациях [5–8]. Эта тенденция усиливается в процессе увеличения скорости деформации металлов. Однако, несмотря на имеющиеся исследования этой проблемы [9], отсутствуют данные о зависи-

мости пластических деформаций, при которых происходит разрушение листовых высокопрочных сталей, от скорости их деформации и напряженного состояния, предшествующего разрушению, что свидетельствует о научной и практической актуальности решения этой задачи. Для ее решения, в широком диапазоне изменения скорости деформации и напряженного состояния материалов, необходимо выбрать или разработать экспериментальные методы исследования механических свойств высокопрочных сталей, что является основной целью данной работы.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ЕЕ РЕШЕНИЯ

Используя разрывные машины, гидравлические прессы, а также оборудование для импульсного приложения деформирующих сил, можно обеспечить скорость деформации листовых высокопрочных сталей от  $10^{-4}$  до  $10^4 \text{ с}^{-1}$  в процессе одноосного и двухосного нагружения до их разрушения. Для проведения исследования влияния скорости деформации ( $\dot{\epsilon}$ ) на деформацию разрушения ( $\epsilon_{cr}$ ) высокопрочных листовых сталей использовали образцы из материалов марок DP980 и DP780 толщиной ( $\delta$ ), равной 1,35 мм, а также ВН240 толщиной 0,65 мм. Деформирование образцов выполнено в квазистатическом и высокоскоростном режимах.

Квазистатическое одноосное растяжение образцов (рис. 1) сталей DP980, DP780, BH240 со скоростью деформации от  $2 \cdot 10^{-4}$  до  $4 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  выполняли на разрывной машине FP 10/1 HECKERT.

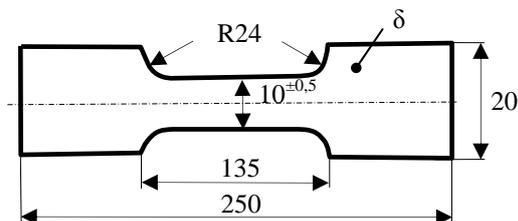


Рис. 1. Образец для статического испытания листового материала на растяжение.

Растяжение образцов этих материалов со скоростью от 0,05 до  $0,3 \text{ с}^{-1}$  производили с помощью специальной оснастки и гидравлического пресса П6324 (рис. 2). Измерение деформаций образца (рис. 1) выполняли с помощью емкостного датчика деформации, который устанавливали на рабочей части образца (рис. 3). Образец с датчиком деформации 1 (рис. 2) закрепляли в зажимах 2 и 3 оснастки, находящихся на плунжере 4 и втулке 5 соответственно, которые установлены на станине 6. Оснастку с образцом ставили на рабочий стол гидравлического пресса 7 и нагружали плунжер 4 штоком гидравлического пресса 8. Под давлением пресса плунжер 4 вместе с зажимом 2 перемещался вниз и растягивал образец вместе с датчиком деформации 1. Емкость датчика деформации изменялась пропорционально удлинению образца. Он был подключен к преобразователю 9, от которого сигнал поступал в цифровой запоминающий осциллограф Tektronix TDS2012B, после чего вычисляли деформацию образца с помощью программы MS Excel. Силу давления пресса определяли как произведение давления масла, регистрируемого по манометру 10, на площадь сечения штока пресса 8. Показания манометра 10 регистрировали в виде электрических сигналов, получаемых от емкостного датчика давления, с помощью которого определяли перемещения трубки Бурдона по изменению его емкости. Одну пластину емкостного датчика давления закрепляли на трубке Бурдона, а вторую – на корпусе манометра. Сигналы от емкостного датчика давления манометра 10 через преобразователь 9 регистрировали с помощью цифрового запоминающего осциллографа Tektronix TDS2012B и затем обрабатывали с помощью программы MS Excel. В результате обработки данных от датчиков деформации и давления определяли диаграмму деформирования образца и скорости его деформации. Тарировку датчика давления выполняли с помощью динамометра, а датчика

деформации – с помощью цифрового штангенциркуля. Погрешность измерения напряжений с помощью разработанной системы лежит в пределах  $\pm 5\%$ , а деформаций –  $\pm 2\%$ .

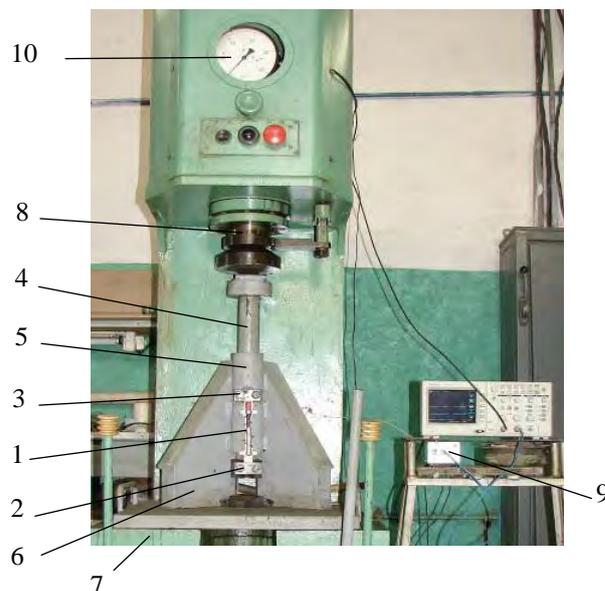


Рис. 2. Гидравлический пресс П6324, оснастка и измерительная система для проведения квазистатических испытаний плоских образцов на растяжение.



Рис. 3. Емкостной датчик деформации, закрепленный на плоском образце.

Двухосное квазистатическое деформирование листовых высокопрочных сталей со средней скоростью деформации от  $0,5$  до  $2 \text{ с}^{-1}$  выполняли с помощью гидравлического пресса П6324 по схеме, показанной на рис. 4. Пластина 1 жестко зашкреплена в корпусе оснастки, что исключало ее скольжение. Поэтому ее прогиб  $W_i$  формировался только за счет деформирования. Чтобы обеспечить равномерное давление на поверхность пластины 1, нагрузку ( $F$ ) от штока пресса через плунжер 2 передавали на ее поверхность через слой увлажненных резиновых прокладок 3 общей толщиной ( $h$ ) не менее радиуса полости 4 ( $R$ ). Чтобы исключить срез пластины 1, острая кромка матрицы имела закругление 5 радиусом  $R_a$ . Определено, что при давлениях более 1 МПа жесткость резины практически не оказывает влияния на равномерность распределения давления на поверхность деформируемых пластин [10], а перед их разрывом давление составляло от 15 до 25 МПа. Перед деформированием пластин на их поверхность наносили контрольную сетку, с помощью которой определяли деформации.

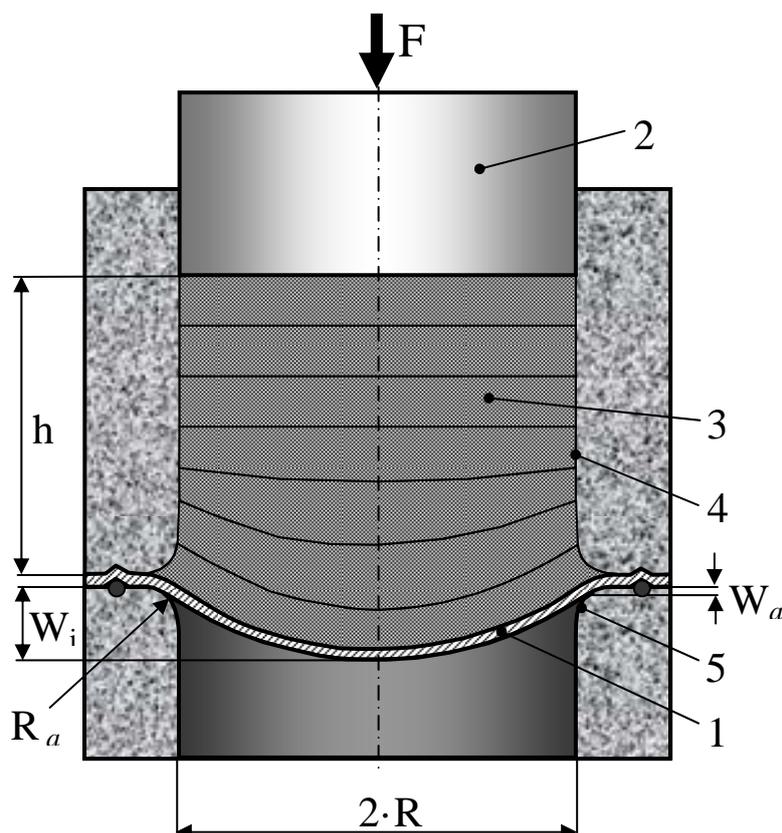


Рис. 4. Схема статического деформирования пластины.

В процессе деформирования образцы разрушались. По изменению размеров контрольной сетки вблизи трещин определяли деформацию в двух направлениях по плоскости образцов и его толщине. По трем составляющим деформации вблизи трещин определяли деформацию разрушения, эквивалентную одноосному растяжению материала ( $\varepsilon_{cr}^*$ ), по формуле [11]:

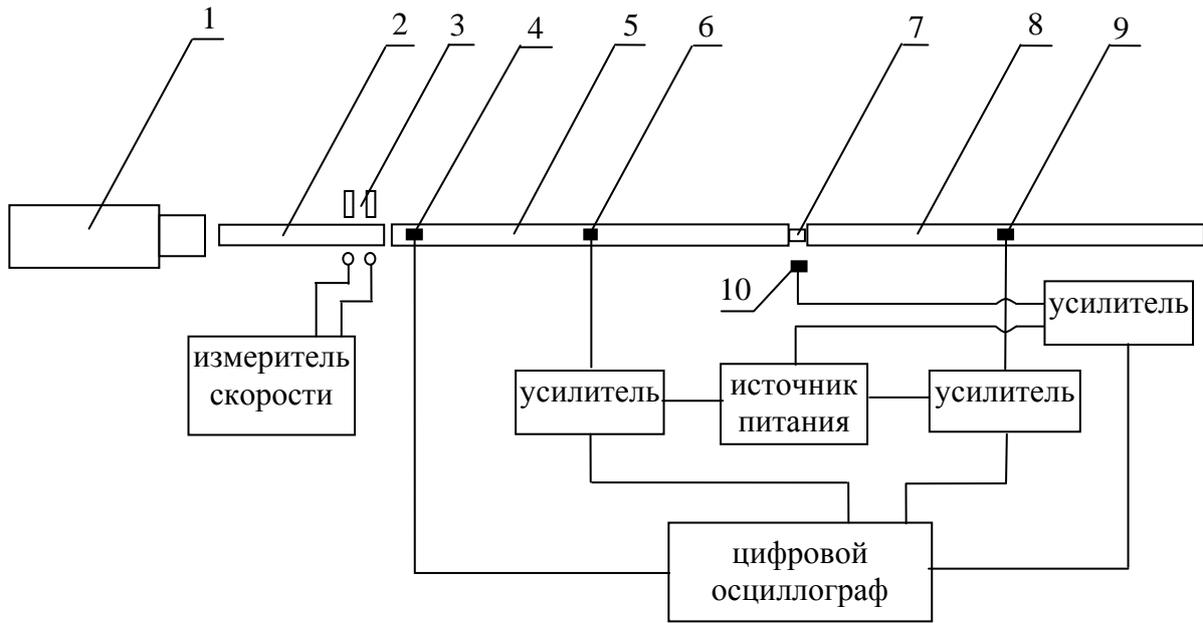
$$\varepsilon_{cr}^* = \sqrt{\frac{2}{3}(\varepsilon_r^2 + \varepsilon_\theta^2 + \varepsilon_z^2)}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_r$  – радиальная деформация;  $\varepsilon_\theta$  – окружная деформация;  $\varepsilon_z$  – деформация по толщине пластины.

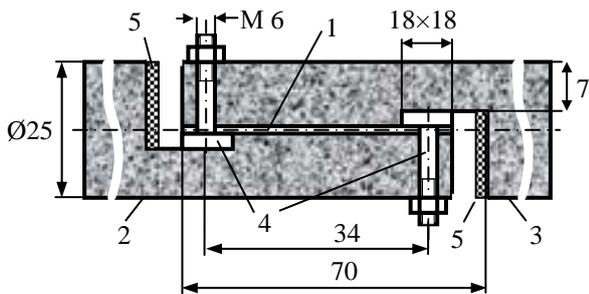
Высокоскоростное одноосное растяжение образцов высокопрочных сталей со скоростью деформации от 300 до 3200 с<sup>-1</sup> выполняли по хорошо обоснованному и апробированному методу Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона, описанному в работах [12, 13]. Этот метод позволяет определять динамические характеристики материалов (в интервале скорости деформации от 200 до 5000 с<sup>-1</sup>) и получать диаграммы динамического деформирования материалов с известной скоростью деформации, а также служит основой для формулировки замыкающих соотношений в теории деформируемого твердого тела [14]. Его можно использовать для определения не только механических характеристик материалов, но и их энергетических и реологических свойств [6, 7].

Схема измерительной системы установки Гопкинсона-Кольского показана на рис. 5. Метод измерения и обработки полученных данных подробно описан в работах [12, 13]. Его использовали для определения диаграмм деформирования и времени релаксации касательных напряжений в зависимости от деформации образца. Существующие методы растяжения материалов по методу Кольского ориентированы на применение «обратной» схемы, в которой образцы нагружают волнами растяжения опорного стержня 8 [13]. Однако при реализации этой схемы появляются существенные помехи в датчиках деформации 6 и 9, возникающие на этапе прохождения в нагружающем 5 и опорном 8 стержнях первичных волн сжатия. Поэтому в данном исследовании использована «прямая» схема растяжения образцов по методу Кольского, лишенная этого недостатка [15], в которой растяжение образцов выполняется в процессе прохождения по стержням первичных волн сжатия [16].

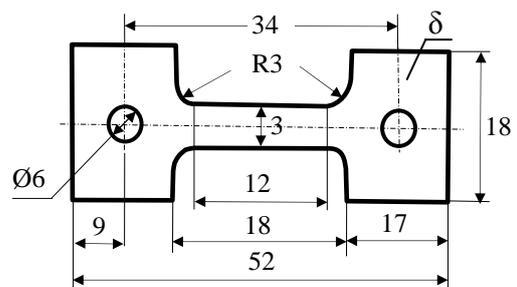
Она отличается от разработанных ранее схем способом крепления образца 1 между нагружающим 2 и опорным 3 стержнями (рис. 6). Один конец образца 1 крепится к нагружающему стержню 2, а второй – к опорному стержню 3 с помощью болтов 4. Для предотвращения разрушения стержней при их соударении после разрыва образца установлены резиновые



**Рис. 5.** Схема расположения элементов измерительной системы. 1 – ускоритель; 2 – ударник; 3 – датчики скорости; 4 – запускающий датчик; 5 – нагружающий стержень; 6 – датчик деформации; 7 – исследуемый образец; 8 – опорный стержень; 9 – датчик деформации; 10 – датчик инфракрасного излучения образца.



**Рис. 6.** Схема расположения плоского образца между нагружающим и опорным стержнями.



**Рис. 7.** Образец для динамического испытания листового материала на растяжение.

демпферы 5. Форма и размеры образцов (рис. 7) соответствуют требованиям ГОСТ 9651-84 для испытания металлов на растяжение. Использование «прямой» схемы деформирования образцов не приводит к изменению метода обработки данных [13] и не вызывает появления дополнительных искажений сигнала. Для регистрации сигналов от датчиков деформации после их усиления использовали цифровой запоминающий осциллограф Tektronix TDS2012B. Обработку данных выполняли с помощью программы MS Excel. Погрешность измерений напряжений и деформаций по разработанной «прямой» схеме испытания образцов лежит в пределах  $\pm 5\%$ .

Двухосное высокоскоростное растяжение пластин высокопрочных сталей выполняли по схеме, изображенной на рис. 8, создавая давление на их поверхность волнами, генерируемыми электрическим разрядом в воде. Деформируемую пластину 1 устанавливали на фланце кольцевой матрицы 2, прижимали кольцом 3, на которое устанавливали корпус разрядной камеры

4 с внутренним диаметром  $D$ . Внутри корпуса разрядной камеры 4 устанавливали электродную систему с низковольтным электродом 5 и высоковольтным 6. Расстояние между электродами 5 и 6 ( $l_{ch}$ ) можно было варьировать в пределах от 10 до 50 мм. Высоковольтный электрод 6 изолировали от корпуса камеры 4 и низковольтного электрода 5 полиэтиленовыми изоляторами 7, 8 и 9. Установка изолирующей цилиндрической оболочки 7 позволяла выполнять разряды между электродами 5 и 6 вдоль оси разрядной камеры. Место соединения высоковольтного кабеля 10 с электродом 6 изолировали полиэтиленовой прокладкой 11, которая прижималась траверсой 12. В результате электрического разряда между электродами 5 и 6 формировались волны давления, генерируемые каналом разряда 13, распространяющиеся в полости разрядной камеры 4, заполненной водой. Они действовали на жестко заземленную пластину 1, вызывая ее деформацию. Минимальное расстояние от канала разряда до пластины равно  $L_m$ . Изменение максимального прогиба пластины в процессе ее

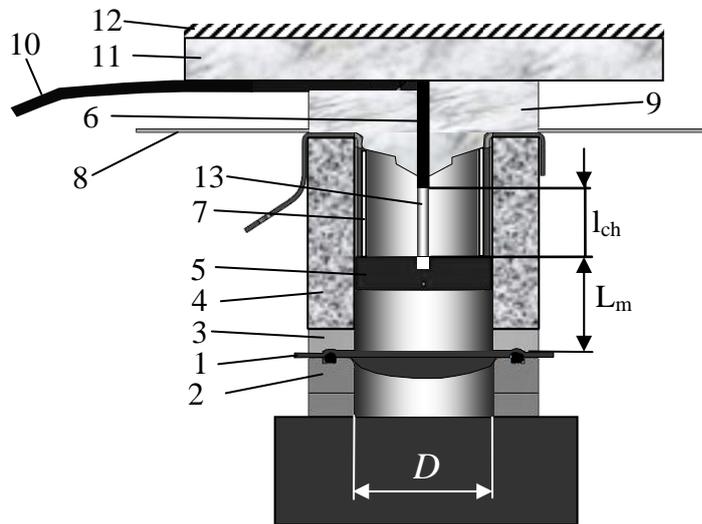


Рис. 8. Схема деформирования пластины при ориентации канала разряда вдоль оси разрядной камеры.

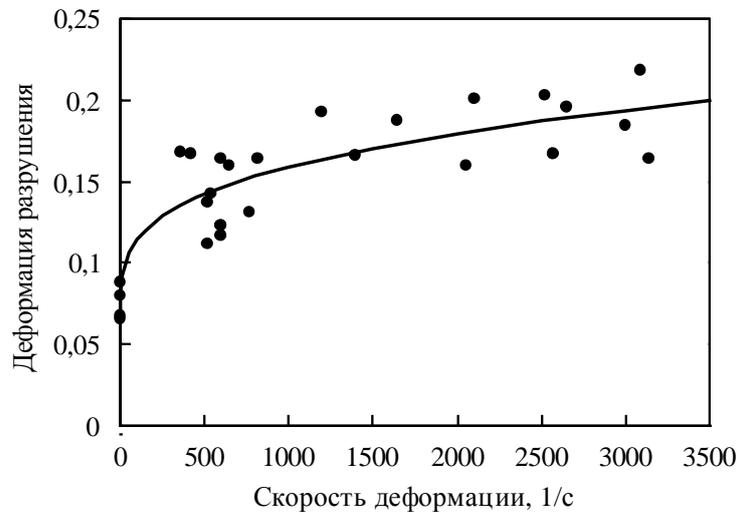


Рис. 9. Зависимость деформаций разрушения образцов листового высокопрочного сплава DP780 в процессе одноосного растяжения от скорости деформации.

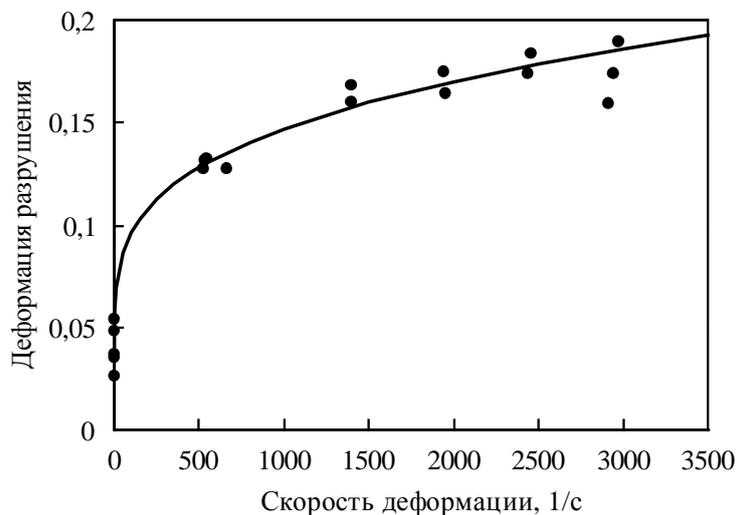


Рис. 10. Зависимость деформаций разрушения образцов листового высокопрочного сплава DP980 в процессе одноосного растяжения от скорости деформации.

деформирования определяли по методу, описанному в работе [10]. Максимальную эквивалентную деформацию пластины вычисляли по ее максимальному прогибу, используя метод [10]. Дифференцируя максимальную эквивалентную деформацию пластины по времени, определяли

скорость ее деформации ( $\dot{\epsilon}^*$ ). Эквивалентную деформацию разрушения  $\epsilon_{cr}^*$  находили по измерениям контрольной сетки вблизи трещин с помощью формулы (1). Эквивалентная скорость деформации пластин волнами давления, генери-

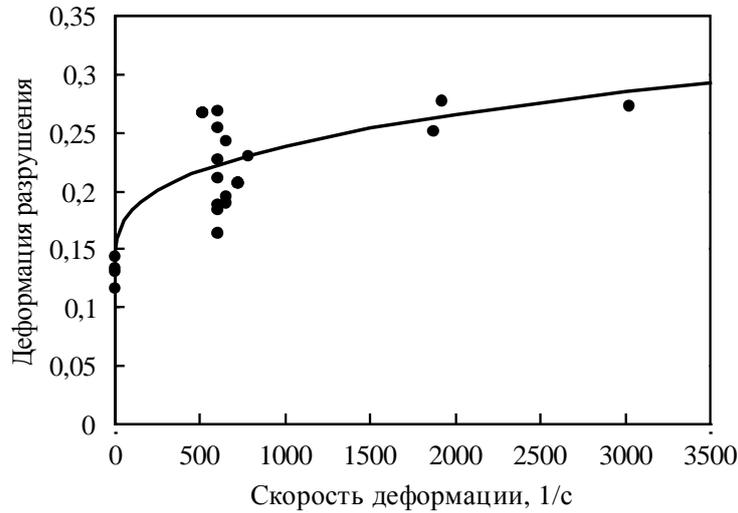


Рис. 11. Зависимость деформаций разрушения образцов листового высокопрочного сплава ВН240 в процессе одноосного растяжения от скорости деформации.

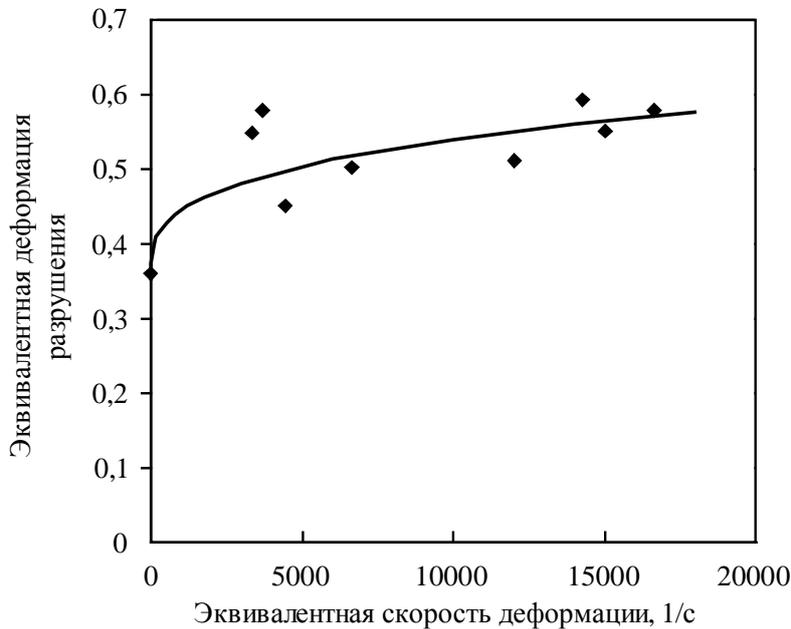


Рис. 12. Зависимость эквивалентной деформации разрушения образцов листового высокопрочного сплава DP780 в процессе двухосного растяжения от эквивалентной скорости деформации.

руемыми электрическим разрядом в воде, изменялась в пределах от 3000 до 17000 с<sup>-1</sup>.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Данные экспериментального исследования влияния  $\dot{\epsilon}$  на  $\epsilon_{cr}$  в процессе одноосного растяжения листовых высокопрочных сталей показаны на рис. 9–11 точками, а их аппроксимация степенной функцией:

$$\epsilon_{cr} = a + b \cdot \dot{\epsilon}^c, \quad (2)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – параметры аппроксимации экспериментальных данных, показана сплошной линией.

Зависимость  $\epsilon_{cr}$  от  $\dot{\epsilon}$  характеризует увеличение прочности исследованных материалов с повышением  $\dot{\epsilon}$ . Эта зависимость существенно нелинейная. Наибольшее влияние  $\dot{\epsilon}$  на  $\epsilon_{cr}$  наблюдается при относительно малых скоростях

деформации ( $\dot{\epsilon} \in [10^{-4}; 4 \cdot 10^2] \text{ с}^{-1}$ ). За пределами этого интервала, когда  $\dot{\epsilon} \in (4 \cdot 10^2; 3 \cdot 10^3] \text{ с}^{-1}$  (режим высокоскоростного деформирования), увеличение прочности материала замедляется при возрастании  $\dot{\epsilon}$ . При скорости деформации  $\dot{\epsilon} = 3000 \text{ с}^{-1}$  деформация  $\epsilon_{cr}$  стали DP780 увеличивается в 2,3 раза, DP980 – в 2,9 раза, а ВН240 – в 1,9 раза. Эти результаты показывают, что высокоскоростное деформирование листовых высокопрочных сталей, даже без предварительного их нагрева, позволяет существенно улучшить пластические свойства этих материалов.

На рис. 12 точками показаны экспериментальные данные, полученные в результате двухосного растяжения стали DP780 с различной

Параметры аппроксимации экспериментальных данных в формуле (2)

Марка стали	$a$	$b$	$c$	Одноосное растяжение	Двухосное растяжение
DP780	0,35	0,012	0,3	–	+
DP780	0,07	0,0112	0,3	+	–
DP980	0,04	0,0155	0,28	+	–
ВН240	0,14	0,0088	0,35	+	–

скоростью деформации, а сплошной линией – их аппроксимация функцией (2). Квазистатическое деформирование выполнено по схеме, показанной на рис. 4, а высокоскоростное – с использованием электрического разряда в воде (рис. 8) [17]. Для квазистатического деформирования пластин использовали матрицу диаметром 120 мм. Высокоскоростное деформирование выполняли, задавая параметры разрядного контура в следующих пределах:  $C = 51$  мкФ;  $U_0 \in [30; 40]$  кВ;  $l_{ch} \in [40; 45]$  мм;  $R_{sh} = 0,07$  Ом;  $L = 5,2$  мкГн, при этом использовали две матрицы с диаметром внутреннего отверстия 60 и 120 мм. Скорость эквивалентной деформации образцов в матрице диаметром 120 мм составляла от  $3 \cdot 10^3$  до  $7 \cdot 10^3$  с<sup>-1</sup>, а в матрице диаметром 60 мм – от  $12 \cdot 10^3$  до  $17 \cdot 10^3$  с<sup>-1</sup>.

Из рис. 12 следует, что зависимость  $\epsilon_{cr}^*$  от  $\dot{\epsilon}^*$  в процессе двухосного растяжения листовых высокопрочных сталей аналогична их одноосному растяжению. По сравнению с квазистатическим деформированием повышение  $\dot{\epsilon}^*$  до  $3 \cdot 10^3$  с<sup>-1</sup> увеличивает  $\epsilon_{cr}^*$  в 1,35 раза, а повышение  $\dot{\epsilon}^*$  до  $17 \cdot 10^3$  с<sup>-1</sup> увеличивает  $\epsilon_{cr}^*$  в 1,6 раза.

Величины параметров аппроксимации полученных данных в формуле (2) приведены в таблице.

## ВЫВОДЫ

Из полученных результатов следует, что описанные методы позволяют исследовать влияние скорости деформации высокопрочных сплавов в интервале от  $10^{-4}$  до  $2 \cdot 10^4$  с<sup>-1</sup> на их предельные деформации.

Определено, что увеличение скорости деформации листовых высокопрочных сплавов DP780, DP980, ВН240 существенно увеличивает деформации их разрушения. Одноосное растяжение со скоростью деформации  $\dot{\epsilon} = 3000$  с<sup>-1</sup> приводит к увеличению деформации разрушения стали DP780 в 2,3 раза, DP980 – в 2,9 раза, а ВН240 – в 1,9 раза. На деформацию разрушения листовых высокопрочных сталей существенно влияет изменение их напряженно-деформированного состояния. Высокоскоростное двухосное растяжение стали DP780 со скоростью деформации

$\dot{\epsilon} = 3000$  с<sup>-1</sup> увеличивает эквивалентные деформации разрушения только в 1,35 раза, а не в 2,3 раза, как при одноосном растяжении. Даже повышение скорости двухосного растяжения стали DP780 до  $17000$  с<sup>-1</sup> приводит к увеличению эквивалентных деформаций разрушения только в 1,6 раза.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Fonstein N. *Advanced High Strength Sheet Steels. Physical Metallurgy, Design, Processing, and Properties*. Springer, 2015.
2. Kim S.B., Huh H., Bok H.N., Moon M.B. *J Mater Process Technol.* 2011, **211**, 851–862. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.01.006>
3. Golovashchenko S.F., Bessonov N.M., Ilinich A.M. *J Mater Process Technol.* 2011, **211**, 875–885.
4. Rohatgi A., Stephens E.V., Davies R.W., Smith M.T. et al. *J Mater Process Technol.* 2012, **212**, 1824–1833.
5. Косенков В.М. *Письма о материалах.* 2014, **4**(1), 18–21. DOI:10.22226/2410-3535-2014-1-18-21.
6. Косенков В.М., Бычков В.М. *Прикладная механика и техническая физика.* 2012, **53**(6), 134–143. DOI: 10.1134/S0021894412060156.
7. Косенков В.М. *Прикладная механика и техническая физика.* 2014, **55**(4), 33–42.
8. Вовченко А.И., Косенков В.М., Старков Н.В., Швец И.С. Пат. 75989, Украина, МПК (2006) B21D26/12, B21J 5/00. *Способ повышения пластичности деталей из высокопрочных алюминиевых сплавов.* № 2004 0604268, заявл.03.06.04, опубл. 15.06.06. Бюл. № 6.
9. Ващенко А.П. *Проблемы прочности.* 2002, (3), 55–61.
10. Kosenkov V.M. *Surf Eng Appl Electrochem.* 2014, **50**(2), 183–193. DOI: 10.3103/S1068375514020070.
11. Shen H., Lissenden C.J. *Mater Sci Eng.* 2002, (8), 271–281.
12. Кольский Г. *Волны напряжения в твердых телах.* М.: Иностранная литература, 1955.
13. Брагов А.М., Ломунов А.К. *Прикладные проблемы прочности и пластичности.* Всесоюзный межвузовский сборник Нижегородского университета. 1995, (51), 127–137.
14. Глушак Б.Л., Куропатенко В.Ф., Новиков С.А. *Исследование прочности материалов при динамических нагрузках.* Новосибирск: Наука, 1992.

15. Косенков В.М. *Письма о материалах*. 2015, **5**(4), 404–408. DOI: 10.22226/2410-3535-2015-4-404-408.
16. Косенков В.М. Пат. 107298, Украина, МПК G01N3/00 (2016.01). *Устройство для испытания образцов листовых материалов на растяжение*. №u2015 12860, заявл. 25.12.2015, опубл. 25.05.16. Бюл. № 10.
17. Косенков В.М., Кузьменко В.Г. *ЭОМ*. 2017, **53**(2), 75–82. DOI: 10.5281/zenodo.1053308.

### Summary

The combination of methods to experimentally study the influence of the deformation rate for high-strength sheet steels (as exemplified by DP780, DP980, and BH 240 steels) on the increase of their plasticity during uniaxial and biaxial stretching is specified.

The deformation rates of steels were measured in a wide range – from  $10^{-4}$  to  $17 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$ . To this end, the tensile machine FP 10/1 HECKERT, the hydraulic press machine P6324 with special tools, the Hopkinson-Kolsky machine, and the electro-hydraulic press T1226B were used. The deformations of the materials destruction during the biaxial stretching were determined using a control grid on their surface. Dependences of the destruction deformations of DP780, DP980, and BH240 steels vs. the deformation rate and their stress-strain state yielding an increase in plasticity of DP780 steel up to 2.9 were identified.

*Keywords:* electric discharge in water, deformation rate, deformation, destruction, stress-strain state, high-strength sheet steel.