

УДК: 621.772.1/2:620.172

## ХАРАКТЕРИСТИКИ МАКРОЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ СТАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ И ИХ СОПРОТИВЛЕНИЕ ВЯЗКОМУ РАЗРУШЕНИЮ

ГУЛЬ Ю. П.<sup>1</sup>, к.т.н., доц.

ИВЧЕНКО А. В.<sup>2\*</sup>, к.т.н., с.н.с.

КОНДРАТЕНКО П. В.<sup>3\*</sup>, асп.

ЧМЕЛЕВА В. С.<sup>4\*</sup>, к.т.н., доц.

ПЕРЧУН Г.И.<sup>5\*</sup>, к.т.н., доц.

<sup>1</sup>Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua, ORCID0000-0003-3754-7731

<sup>2\*</sup>Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: armst\_2000@mail.ru, ORCID0000-0002-4518-1744

<sup>3\*</sup>Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: achriman@yandex.ua, ORCID0000-0003-2242-3496

<sup>4\*</sup>Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua

<sup>5\*</sup> Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: perchun\_galina@ukr.net, ORCID 0000-0001-9013-4659

**Аннотация.**Цель. На основе сопоставительного анализа теоретических предпосылок и результатов проведенных экспериментов обосновать использование равномерной деформации и характеристик деформационного упрочнения по Консидеру-Харту как параметров сопротивления стали вязкому разрушению. **Методика.** Аналитические исследования современных представлений об условиях макролокализации пластической деформации в совокупности с экспериментальными исследованиями поведения под нагрузкой стальных объектов из низкоуглеродистой стали в неупрочненном и упрочненном холодной деформацией и деформационном старением структурных состояниях с использованием в том числе больших выборок экспериментальных данных и их статистической обработкой. **Результаты.** Получены в зависимости от структурного состояния стали четыре основных типа диаграмм деформации и разрушения, характеризующие в том числе уровень сопротивления вязкому разрушению, показано благоприятное влияние на этот уровень интенсивности деформационного упрочнения и подтверждено статистически благоприятное влияние последнего на величину равномерной деформации в рамках канонических уравнений Консидера-Харта. Предложены: как объяснение наблюдаемых количественных отклонений в эксперименте от указанных уравнений, так и использование их в качестве оценки величины дисперсии свойств микрообъемов. Обосновано использование значения равномерной деформации с указанием величины отклонения этого значения от значения коэффициента деформационного упрочнения как меры сопротивления вязкому разрушению. **Научная новизна.** Впервые предложена и обоснована теоретически характеристика сопротивления вязкому разрушению стали в форме значения равномерной деформации с учетом величины отклонения значения этой величины от определяемого в эксперименте значения коэффициента деформационного упрочнения как меры дисперсии распределения значений скорости деформационного упрочнения в микрообъемах нагружаемого объекта. Впервые показано, что при достаточно большом объеме выборки и правильном определении значений равномерной деформации  $\epsilon_p$ , коэффициент  $\alpha$  в уравнении  $\epsilon_p = \alpha n$  (Консидер-Харт), где  $n$  – коэффициент деформационного упрочнения, близок к единице. **Практическая значимость.** Предложено включить в перечень свойств определяемых при статочных испытаниях холоднодеформированных изделий, особенно подверженных низкотемпературному (до 100 °С) деформационному старению, новую характеристику сопротивления вязкому разрушению:  $\epsilon_p$  с указанием отклонения  $(n-\epsilon_p)$ . Предложен режим старения, увеличивающий значение  $\epsilon_p$  и уменьшающий величину  $(n-\epsilon_p)$ .

**Ключевые слова:** макролокализация пластической деформации, одноосное растяжение, деформационное упрочнение, холодная деформация, старение, коэффициент деформационного упрочнения, уравнение Консидера-Харта, сопротивление вязкому разрушению

## ХАРАКТЕРИСТИКИ МАКРОЛОКАЛІЗАЦІЇ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ ОДНООСНОМУ РОЗТЯГУВАННІ СТАЛЕВИХ ОБ'ЄКТІВ ТА ЇХ ОПРВ'ЯЗКОМУ РУЙНУВАННЮ

ГУЛЬ Ю. П.<sup>1</sup>, к.т.н., доц.

ИВЧЕНКО О. В.<sup>2\*</sup>, к.т.н., с.н.с.

КОНДРАТЕНКО П. В.<sup>3\*</sup>, асп.

ЧМЕЛЬОВА В. С.<sup>4\*</sup>, к.т.н., доц.  
ПЕРЧУН Г.І.<sup>5\*</sup>, к.т.н., доц.

<sup>1</sup>Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, м. Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua, ORCID0000-0003-3754-7731

<sup>2\*</sup>Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, м. Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: armst\_2000@mail.ru, ORCID0000-0002-4518-1744

<sup>3\*</sup>Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, м. Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: achriman@yandex.ua, ORCID0000-0003-2242-3496

<sup>4\*</sup>Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, м. Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua

<sup>5\*</sup> Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, м. Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: perchun\_galina@ukr.net, ORCID 0000-0001-9013-4659

**Анотація. Мета.** На основі порівняльного аналізу теоретичних передумов і результатів проведених експериментів обґрунтувати використання рівномірної деформації і характеристик деформаційного зміцнення по Консидеру-Харту як параметрів опору сталі в'язкому руйнуванню. **Методика.** Аналітичні дослідження сучасних уявлень про умови макролокалізації пластичної деформації в сукупності з експериментальними поведінками під навантаженням сталевих об'єктів з низьковуглецевої сталі в незміцненому і зміцненому холодною деформацією і деформаційним старінням структурних станів з використанням в тому числі великих вибірок експериментальних даних та їх статистичною обробкою. **Результати.** Отримані в залежності від структурного стану сталі чотири основних типи діаграм деформації і руйнування, що характеризують у тому числі рівень опору в'язкому руйнуванню, показано сприятливий вплив на цей рівень інтенсивності деформаційного зміцнення та підтверджено статистично сприятливий вплив останньої на величину рівномірної деформації в рамках канонічних рівнянь Консидера-Харта. Запропоновано: як пояснення спостережуваних кількісних відхилень в експериментів від зазначених рівнянь, так і використання їх в якості оцінки величини дисперсії властивостей мікрооб'ємів. Обґрунтовано використання значення рівномірної деформації з зазначенням величини відхилення цього значення від значення коефіцієнта деформаційного зміцнення як заходи опору в'язкому руйнуванню. **Наукова новизна.** Вперше запропонована і обґрунтована теоретично характеристика опору в'язкому руйнуванню сталі в формі величини рівномірної деформації з урахуванням величини відхилення значення цієї величини від визначеного у експерименті значення коефіцієнта деформаційного зміцнення як міри дисперсії розподілу значень швидкості деформаційного зміцнення в мікрооб'ємах навантажувомого об'єкта. Вперше показано, що при достатньо великому обсязі вибірки і правильному визначенні значень рівномірної деформації  $\epsilon_p$ , коефіцієнт  $\alpha$  в рівнянні  $\epsilon_p = \alpha n$  (Консидер-Харт), де  $n$  – коефіцієнт деформаційного зміцнення, близький до одиниці. **Практична значимість.** Запропоновано включити до переліку властивостей визначаємих при здавальних випробуваннях холоднодеформованих виробів, особливо підвернених низькотемпературному (до 100 °С) деформаційному старінню, нову характеристику опору в'язкому руйнуванню:  $\epsilon_p$  із зазначенням відхилення ( $n\text{-}\epsilon_p$ ). Запропонований режим старіння, що збільшує значення  $\epsilon_p$  і зменшує величину ( $n\text{-}\epsilon_p$ ).

*Ключові слова:* макролокалізація пластичної деформації, одновісний розтяг, деформаційне зміцнення, холодна деформація, старіння, коефіцієнт деформаційного зміцнення, рівняння Консидера-Харта, опір в'язкому руйнуванню

## CHARACTERISTICS OF MACROLOCALIZATION PLASTIC DEFORMATION UNDER UNIAXIAL TENSION STEEL OBJECTS AND THEIR RESISTANCE TO DUCTILE FRACTURE

GUL Yu. P.<sup>1</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Associate professor*  
IVCHENKO A. V.<sup>2\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Senior Research Officer*  
KONDRATENKO P. V.<sup>3\*</sup>, *Graduate student*  
CHMELEVA V. S.<sup>4\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Associate professor*  
PERCHUNG. I.<sup>5\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Associate professor*

<sup>1</sup>Department of metal heat treatment, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin Avenue, 4, 49600, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua, ORCID0000-0003-3754-7731

<sup>2\*</sup> Department of metal heat treatment, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin Avenue, 4, 49600, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: armst\_2000@mail.ru, ORCID0000-0002-4518-1744

<sup>3\*</sup> Department of metal heat treatment, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin Avenue, 4, 49600, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: achriman@yandex.ua, ORCID 0000-0003-2242-3496

<sup>4\*</sup> Department of metal heat treatment, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin Avenue, 4, 49600, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua

<sup>5\*</sup> Department of metal heat treatment, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin Avenue, 4, 49600, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: perchun\_galina@ukr.net, ORCID 0000-0001-9013-4659

**Annotation. Purpose.** On the basis of the comparative analysis of theoretical prerequisites and experimental results to justify the use of uniform deformation and strain hardening characteristics on Consider-Hart as parameters of resistance of steel viscous destruction. **Methodology.** Analytical study of modern concepts about the conditions of microlocalization plastic deformation in combination with experimental studies on the behaviour of steel under load objects from low-carbon steel in soft and hardened by cold deformation and strain ageing of structural conditions using including large samples of experimental data and their statistical treatment. **Findings.** Obtained depending on the structural state of the four main types of charts of deformation and fracture characterizing in including the resistance of viscous destruction shown a beneficial effect on the level of intensity of strain hardening, and confirmed a statistically favorable impact on the value of uniform deformation in the framework of the canonical equations of Consider-Hart. Offered: as explanation for the observed quantitative deviations in the experiment from the above equations, and use them as estimates of the magnitude of the dispersion property of micro volumes. It justifies the use of the uniform deformation value indicating the deviation of this value from the values of the coefficient of strain hardening as a measure of resistance of viscous destruction. **Originality.** First proposed and justified theoretically characteristic of the viscous resistance to fracture of steel in the form of the value of uniform deformation taking into account the deviation values determined from experiment the values of the coefficient of strain hardening as a measure of dispersion in a distribution of speed values of strain hardening in micro load of the object. It was shown that at a sufficiently large volume of sample and the correct determination of the values of uniform strain  $\epsilon_p$ , the coefficient  $\alpha$  in the equation  $\epsilon_p = \alpha n$  (Consider-Hart), where  $n$  is the strain hardening coefficient, close to unity. **Practical value.** Proposed to include in the list of properties defined by acceptance tests cold-formed products, especially susceptible to low-temperature (to 100 °C) deformation aging, a new characteristic of the viscous resistance destruction:  $\epsilon_p$  indicating the deviation ( $n - \epsilon_p$ ). Proposed mode of aging that increase the value of  $\epsilon_p$  and reduce the value of ( $n - \epsilon_p$ ).

**Keywords:** macrolocalization plastic deformation, uniaxial tensile tests, strain hardening, cold deformation, aging, strain hardening coefficient, the equation of Consider-Hart, the resistance of the viscous destruction

### Введение

При оценке конструктивной прочности металлоизделий, в том числе характеристик сопротивления разрушению, основное внимание уделяется определению характеристик сопротивлению хрупкому разрушению вследствие его низкой энергоемкости и катастрофичности протекания его заключительной нестабильной стадии: высокой скорости протекания процесса при постоянной или снижающейся нагрузке или вообще без внешнего подвода энергии. До сих пор достаточно широко распространено мнение, что если нагружаемый объект (НО) находится в вязком состоянии, то его механическое поведение относительно стабильно и даже стадия разрушения не имеет указанных выше признаков катастрофичности. Такой подход, однако, потенциально опасен. Достаточно давно обращалось внимание на опасность и возможность протекания в НО т.н. вязкого разрушения (ВР) по хрупкому типу, если в НО выражен процесс локализации пластической деформации (ЛПлД) [9]. Последний, как известно, характеризуется сосредоточением ПлД в локальных объемах и высокой скоростью протекания процесса ПлД. Так как по А.Х. Коттреллу роль ПлД при ВР заключается в “отводе материала от фронтарастущей трещины” [7], то опасность ВР НО по хрупкому типу прямо связана со степенью склонности металла в данном НО к ЛПлД. Следовательно, актуальной задачей является исследование и разработка методик определения характеристик сопротивления ВР (СВР) НО как характеристик условий перехода микро-ЛПлД (характерной для любой стадии ПлД анизотропного материала) в макро-ЛПлД. Принципиально важным здесь является обсуждение и экспериментальная проверка корректности канонических уравнений Консидера-Харта, связывающих значение равномерной деформации  $\epsilon_p$  с характеристиками

деформационного упрочнения (ДУ) при рассмотрении материала НО как изотропного и при отсутствии существенных отклонений свойств микрообъемов от средних их значений макрообъема НО [13]. Всего через 5 лет после публикации работы [13] было показано, что при деформационном старении стали *увеличение* скорости ДУ сопровождается *уменьшением* значений  $\epsilon_p$ , что противоречит уравнению работы [13] и было подтверждено в последующем [1, 3]. В обстоятельном аналитическом обзоре [8] с ссылкой на работы 1990 – 1997-х годов (см. напр. [10]) также ставятся под сомнение уравнения работы [13]. Однако, пока не предложены другие, адекватные по своей простоте и возможностям экспериментальной проверки выражения, по сравнению с уравнением Консидера-Харта. Да и статистическая проверка последнего не проводилась, равно как и причины отклонений от них не исследованы в надлежащей степени. Данная работа по обоснованию возможности определения характеристик СВР при одноосном растяжении проведена с учетом изложенного выше.

### Цель

Обоснование целесообразности использования значения равномерной деформации при одноосном растяжении с учетом величины отклонения от уравнения Консидера-Харта как характеристики СВР.

### Методика

Эксперименты проведены на различных образцах диаметром от 6 до 10 мм, изготовленных из различных марок низкоуглеродистой стали с содержанием углерода от 0,04 до 0,20 % (масс.доля) и с различным структурным состоянием (СС). Исследовали также натурные металлоизделия

(болты) с наличием функциональных надрезов (резьбы). Различное СС исследуемых объектов достигалось: различными способами формирования геометрии НО (горячая и холодная деформация), режимами термической обработки, способом и степенью холодной деформации с последующим старением при различных температурах. Все перечисленные объекты подвергали одноосному растяжению на машине ФР 100/1, с записью полных технических диаграмм деформации и разрушения (ТДР) с последующей перестройкой их в истинные и определением истинной равномерной деформации  $\epsilon_p$  и коэффициента деформационного упрочнения  $n$  в уравнении Холломоны. На одном из объектов – низкоуглеродистой катанке – в состоянии поставки и после холодной деформации на различную степень растяжением и кручением с последующим старением при различных температурах исследовали влияние 78 режимов термической и деформационной обработки на указанные выше свойства при растяжении. Так как каждому типу режима подвергали 5 образцов, то полученная выборка из 78 независимых величин – результат 390 испытаний. На основе этой выборки путем ее статистической обработки известными методами исследовали степень корреляции между  $\epsilon_p$  и  $n$  и вид получаемых уравнений регрессии. Схема одноосного растяжения выбрана потому, что при ней особенно наглядно проявляется роль деформационного упрочнения (ДУ) и геометрического разупрочнения (ГР) в условиях перехода от микро-ЛПлД к макро-ЛПлД. Полученные данные анализировали, в том числе с привлечением подходов, описанных в работах [2 – 6, 9, 11, 12, 14].

### Результаты

Анализ показывает, что область равномерной деформации (ОРД), характеризующаяся сохранением геометрического подобия НО исходному, может как наличествовать на ТДР, так и практически отсутствовать на них в зависимости от исходного СС НО (см. рис. 1, а). При этом наблюдаются 4 основных варианта хода функции  $P = f(\Delta l)$ : 1) ОРД соответствует росту  $P$  с ростом  $\Delta l$  при наличии хорошо выраженного максимума  $P$ ; 2) ОРД соответствует росту  $P$  и примерному постоянству  $P$  с ростом  $\Delta l$  (две стадии ОРД при “размытом” максимуме  $P$ ); 3) ОРД совпадает только со второй стадией ОРД по 2-му варианту; 4) ОРД практически отсутствует: макро-ЛПлД начинается сразу при переходе к макро-ПлД. Последний вариант имеет место – в исследованных пределах – только при определенных неравновесных исходных СС: упрочнение холодной деформацией + низкотемпературное старение. Так как после ОРД следует стадия макро-ЛПлД, сопровождающаяся нестабильной стадией ВР, т.е. полная потеря несущей способности НО, то увеличение СВР можно ожидать (при прочих равных условиях) в следующей последовательности вариантов на рис. 1, а: 4), 3), 1),

2). Другими словами, выраженная стадия ДУ с нерезким последующим переходом к этапу преобладания ГР над ДУ – обеспечит наибольшее СВР НО. Конечно, здесь важна и протяженность ОРД – значение  $\epsilon_p$ , причем, особенно на стадии преобладания ДУ над ГР. Поэтому при 2-м варианте следует указывать не только общее значение  $\epsilon_p$ , но и значение стадии ОРД, где  $DU > GR$ . Производная  $P = SF_x$  по степени деформации  $e$ :

$$\frac{\partial P}{\partial e} = \frac{\partial S}{\partial e} F_x - S \frac{\partial F_x}{\partial e} \quad (1)$$

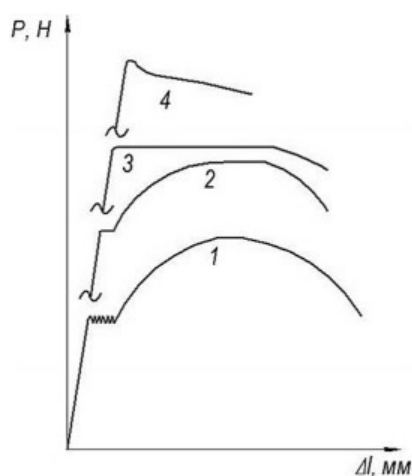
где  $S$  – истинное напряжение, а  $F_x$  – истинная площадь поперечного сечения НО, позволяет определить условие получения ОРД

$$\frac{\partial S}{\partial e} \cdot F_x \geq \frac{\partial F_x}{\partial e} \cdot S \quad (2)$$

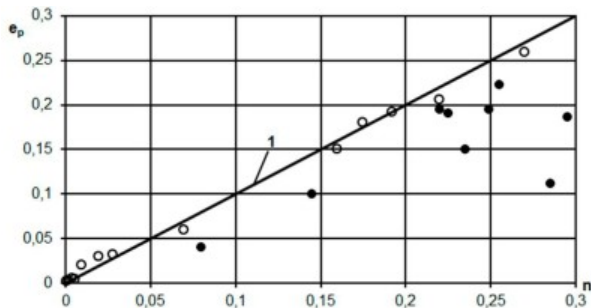
как преобладание или равенство скорости ДУ относительно скорости ГР. Условие по выражению (2) отличаются от условия Косидера-Харта [3]: максимальное значение ОРД ограничено равенствами  $S = \partial S / \partial e$ , а  $\epsilon_p^{max} = n$ . Этим с одной стороны, исключаются экспериментально наблюдаемые варианты 2) и 3) (рис. 1, а), а с другой не учитывается весьма вероятное влияние величины дисперсий распределения значений  $\partial S / \partial e$  и  $\partial F_x / \partial e$  в микрообъемах реальных металлических НО на ограничение ОРД. Вполне вероятно также, что при реализации вариантов ОРД с соблюдением примерного равенства ДУ и ГР начальная стадия ВР, происходящая как образование “вакансионных” пор (ВП) [5], может не только усиливать ГР через уменьшение “живого” сечения НО, но и усиливать ДУ, давая эффект своеобразного дисперсионного твердения [4]. Обобщение полученных экспериментальных данных, приведенное на рис. 1, б, показывает, что эти данные, с одной стороны, подтверждают благоприятное влияние увеличения интенсивности ДУ на значение  $\epsilon_p$  как характеристики СВР. С другой стороны, только при сравнительно равновесном исходном СС экспериментальные точки соответствуют уравнению  $\epsilon_p = n$ , но при упрочнении холодной деформацией с последующим старением, а также при наличии у НО функциональных надрезов (резьбы) – отклонения от указанного уравнения существенны.

Данные, приведенные на рис. 2, показывают, что при использовании достаточно большой выборки с существенно различными СС стали как сравнительно равновесными, так и неравновесными (см. раздел **Методика**), наблюдается хорошая статистически достоверная корреляция в форме линейной возрастающей зависимости между значениями  $\epsilon_p = f(n)$ . При этом указанная зависимость вполне описывается уравнением  $\epsilon_p = \alpha n$ , где  $\alpha$ , хотя и меньше единицы, но близок к ней. Следовательно, статистически экспериментально в общем подтверждается это уравнение Консидера-Харта во

всяком случае для низкоуглеродистой стали, подвергаемой холодной деформации одноосным растяжением в условиях слабой скоростной зависимости деформирующего напряжения. В то же время хорошо видно, что большинство экспериментальных точек лежит ниже прямой, соответствующей уравнению  $\epsilon_p = n$ , т.е. количественные отклонения от канонического уравнения имеют место в большинстве исследованных случаев. Целесообразно, однако, рассматривать эти отклонения не как основание некорректности канонического уравнения



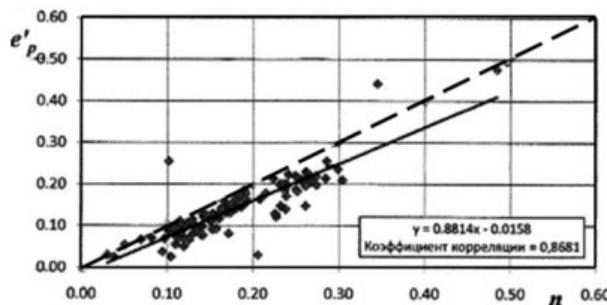
а



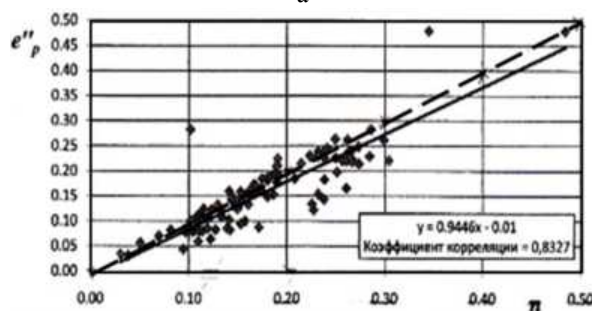
б

Рис. 1 – Наблюдаемые в эксперименте варианты изменения нагрузки выше предела текучести (схемы) для НО из низкоуглеродистой стали с различным исходным СС (а) и зависимость между значениями коэффициента деформационного упрочнения  $n$  и равномерной деформации  $\epsilon_p$  по уравнению Консидера-Харта (1) и данные экспериментов в исследованных пределах (точки) (б) / Observed in the experiment options change the load above the yield limit (schema) for loading the object from low carbon steel with different initial structure state (a) and the dependence between the values of the coefficient of strain hardening  $n$  and uniform deformation of  $\epsilon_p$  by the equation of Consider-Hart (1) and the experimental data in the investigated range (dots) (b)

(ведь статистически  $\epsilon_p$  растет с увеличением  $n$ ), а – с учетом указанных выше допущений при выводе уравнений Консидера-Харта – как количественную меру дисперсии распределения значений  $\frac{\partial S}{\partial \epsilon}$  в микрообъемах НО. Последние позволяет рассматривать значение  $(n-\epsilon_p)$  как важную составляющую предлагаемой характеристики СВР:  $\epsilon_p$  и  $(n-\epsilon_p)$ , а с другой стороны, - решать задачу: существенно не изменяя других свойств НО (например, уровня прочности), уменьшать значение  $(n-\epsilon_p)$  за счет увеличения однородности свойств микрообъемов.



а



б

Рис. 2 – Корреляционная зависимость между значениями равномерной деформации  $\epsilon_p$  и значениями коэффициента деформационного упрочнения  $n$  низкоуглеродистой стали, подвергнутой различным режимам термической и деформационно-термической обработки: а – определение  $\epsilon_p$  по точке окончания увеличения нагрузки; б – определение  $\epsilon_p$  по срединной точке отрезка примерного постоянства нагрузки / The correlation between the values of uniform strain  $\epsilon_p$  and the values of the coefficient of strain hardening  $n$  low-carbon steel subjected to various regimes of heat and deformation-thermal processing: а – the definition of  $\epsilon_p$  by the end point of the load increase; б – the definition of  $\epsilon_p$  by the midpoint of the line segment of the approximate constancy of the load

#### Научная новизна и практическая ценность

Впервые предложена и обоснована теоретически характеристика сопротивления вязкому разрушению стали в форме значения равномерной деформации с учетом величины отклонения значения этой величины от определяемого в эксперименте значения

коэффициента деформационного упрочнения как меры дисперсии распределения значений скорости деформационного упрочнения в микрообъемах нагружаемого объекта. Впервые показано, что при достаточно большом объеме выборки и правильном определении значений равномерной деформации  $\epsilon_p$ , коэффициент  $\alpha$  в уравнении  $\epsilon_p = \alpha n$  (Консидер-Харт), где  $n$  – коэффициент деформационного упрочнения, близок к единице.

Предложено включить в перечень свойств определяемых при статочных испытаниях холоднодеформированных изделий, особенно подверженных низкотемпературному (до 100 °С) деформационному старению, новую характеристику сопротивления вязкому разрушению:  $\epsilon_p$  с указанием отклонения ( $n-\epsilon_p$ ). Предложен режим старения, увеличивающий значение  $\epsilon_p$  и уменьшающий величину ( $n-\epsilon_p$ ).

### Выводы

1. На основе аналитических и экспериментальных исследований установлено, что значение

равномерной деформации при одноосном растяжении можно обосновано использовать как характеристику сопротивления вязкому разрушению, причем наиболее его опасной нестабильной стадии.

2. Показано, что уравнение  $\epsilon_p = f(n)$  Консидера-Харта при использовании достаточно большой выборки качественно достоверно, а количественные отклонения от него можно рассматривать как меру неоднородности свойств микрообъемов нагружаемого объекта.

3. Предложена комплексная характеристика сопротивления вязкому разрушению: значения равномерной деформации ( $\epsilon_p$ ), коэффициента деформационного упрочнения ( $n$ ) и величины отклонения от зависимости Консидера-Харта ( $n-\epsilon_p$ ). При прочих равных условиях сопротивление вязкому разрушению растет с увеличением  $\epsilon_p$ ,  $n$  и уменьшением ( $n-\epsilon_p$ ).

4. При соответствующем виде диаграммы деформации и разрушения особо важное значение для указанной выше характеристики имеет величина  $\epsilon_p$ , соответствующая постоянному росту нагрузки.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бабич В. К., Гуль Ю. П., Долженков И. Е. Деформационное старение стали // М.: Metallurgiya, 1972.- 320с.
2. Гуляев А.П. Пластическая деформация за пределом прочности // МиТОМ. - 1996. - №12. – С.20-22.
3. Гуль Ю.П., Рябчий М.М., Рябчий В.В., Каминская И.Ф. Эффекты упрочнения и локализации деформации при деформационном старении технического железа // Проблемы прочности. – 1982. - №10. – с. 82 – 85.
4. Гуль Ю.П., Чмелева В.С. Вакансионное легирование металлов // Металознавство та термічна обробка металів. – 2001. - №1. – с. 13 – 27.
5. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов / Под ред. акад. В.И. Трефилова – К.: Наукова думка, 1987. – 246с.
6. Колбасников Н.Г., Метс Ю.А., Трифонова И.А., Журакова Н.В., Николаюк А.В. Анализ устойчивости пластической деформации металлов // Металлы. – 1997. – №5. – С. 72-79.
7. Коттрелл А.Х. Дислокации и пластическое течение в кристаллах. – М.: Metallurgizdat, 1958. – 268с.
8. Криштал М.М. Неустойчивость и мезоскопическая неоднородность пластической деформации (аналитический обзор). Часть II Теоретические представления о механизмах неустойчивости пластической деформации // Физическая мезомеханика. Т. 7 – 2004. - №5. – с. 31 – 45.
9. Мак Лин Д. Механические свойства металлов. – М.: Metallurgiya, 1965. – 432с.
10. Moriwaki M., Ito K., Inui H., Yamaguchi M. Plastic deformation of single crystals NbSi<sub>2</sub> with C 40 structure // Mat. Sci. Eng. A. – Struct. – 1997. – V. 240 – pp. 69-74.
11. Никулин С.А. Два варианта потери устойчивости течения при растяжении и пластичность сплавов // ФММ. – 1996. – Т. 81. – вып. 3 – С. 142-158.
12. S. A. Barannikova, Y. Ivanov, D. Kosinov, S. Kononov, O. Stolboushkina, V. Gromov, Plastic Deformation Localization of Low Carbon Steel: Hydrogen Effect // Advanced Materials Research. – 2014. - Vol. 1013. - pp. 77-83.
13. Hart E.W. Theory of the tensile test. – Acta met. – 1967. – V. 15 – №2. – pp. 351 – 355.
14. H.S. Ho, M. Risbet, X. Feaugas, G. Moulin The effect of grain size on the localization of plastic deformation in shear bands // Scripta Materialia. - 2011. - Vol. 65. – pp. 998-1001.

### REFERENCES

1. Babich V. K., Gul Yu. P., Dolzhenkov I. E. *Deformatsionnoe starenie stali* [Strain aging steel] // М.: Metallurgiya, 1972 – 320 p. (in Russian).
2. Guljaev A.P. *Plastycheskaja deformacyja zapredelom prochnosti* [Plastic deformation beyond the ultimate strength] // Metal Science and Heat Treatment. - 1996. - №12. – pp.20-22. (in Russian).
3. Gul Yu.P., Rjabchij M.M., Rjabchij V.V., Kamynskaja Y.F. *Effect uprochnenija y lokalizacyy deformacyy pry deformacionnom starenii tekhnicheskogo zheleza* [The effects of hardening and localization of deformation during strain aging of iron technical] // Problems of strength. – 1982. - №10. – pp. 82 – 85. (in Russian).

4. GulYu.P., Chmeleva V.S. *Vakansyonnoe leghyrovanye metallov* [Vacancy alloying metals] // Metal Science and Heat Treatment. – 2001. - №1. – pp. 13 – 27.(in Russian).
5. *Deformatsionnoe uprochnenye y razrusheniye polykrystallicheskykh metallov* [Strain hardening and fracture of polycrystalline metals] / Podred.. akad.. V.Y. Trefylova – Kiev.: Naukova Dumka, 1987. – 246p.(in Russian).
6. Kolbasnikov N. G., Mets Y. A., Trifonova I. A., Jurukova N. In., Nikolaus V. A. *Analyz ustojchivosti plastycheskoj deformatsyy metallov* [The stability analysis of plastic deformation of metals]//Metals. – 1997. –№5. – pp. 72-79.(in Russian).
7. Kottrell A.Kh. *Dyslokatsyy i plastycheskoe techenye v krystallakh* [Dislocation and plastic flow in crystal]. – Moscow: Metallurgizdat, 1958. – 268p. (in Russian).
8. Krishtal M. M. *Neustojchivostji mezoskopicheskoj neodnorodnostj plastycheskoj deformatsyy (analyticheskiy obzor). Chastj II Teoreticheskiye predstavleniya o mekhanizmaxh neustojchivosti plastycheskoj deformatsyy* [Instability and mesoscopic inhomogeneity of plastic deformation (analytical review). Part II Theoretical views on mechanisms of plastic deformation instability] // Physical mesomechanics. - Vol. 7 – 2004. - №5. – pp. 31 – 45.(in Russian).
9. Mak Lin D. *Mekhanicheskiye svoystva metallov* [The mechanical properties of metals]. – Moscow: Metallurgy, 1965. – 432p.(in Russian).
10. Moriwaki M., Ito K., Inui H., Yamaguchi M. Plastic deformation of single crystals NbSi<sub>2</sub> with C 40 structure // Mat. Sci. Eng. A. – Struct. – 1997. – V. 240 – pp. 69-74.
11. Nikulin S. A. *Dva varyanta potery ustojchivosti techeniya pry rastjazhenii i plastychnostj splavov* [Two versions of the loss of stability of the flow and tensile ductility of the alloys] // FMM. – 1996. – Vol. 81. – №. 3 – pp. 142-158.(in Russian).
12. S. A. Barannikova, Y. Ivanov, D. Kosinov, S. Kononov, O. Stolboushkina, V. Gromov, Plastic Deformation Localization of Low Carbon Steel: Hydrogen Effect // Advanced Materials Research. – 2014. - Vol. 1013. - pp. 77-83.
13. Hart E.W. Theory of the tensile test. – Acta met. – 1967. – V. 15 – №2. – pp. 351 – 355.
14. H.S. Ho, M. Risbet, X. Feugas, G. Moulin The effect of grain size on the localization of plastic deformation in shear bands // Scripta Materialia. - 2011. - Vol. 65. – pp. 998-1001.

*Статья рекомендована к публикации д-ром техн. наук, В.И. Большаковым и д-ром техн. наук, Д.В. Лаухиным (Украина)*