

УДК: 621.785.5:621.961.2

## ЭФФЕКТ “УПРОЧНЕНИЯ В НАДРЕЗЕ” ПРИ ЕДИНИЧНОМ НАДРЕЗЕ И СИСТЕМЕ НАДРЕЗОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИСХОДНОГО УРОВНЯ ПРОЧНОСТИ

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 аналитического и экспериментальных исследований выявить и обобщить закономерности количественного влияния геометрии надрезов и – особенно системы надрезов и уровня исходной прочности – на величину эффекта упрочнения в надрезе.*Методика.* Аналитические исследования по систематизации литературных данных о количественном влиянии различных факторов на эффект упрочнения в надрезе в сопоставлении с экспериментальными данными влияния единичных надрезов и системы надрезов различной геометрии на модельных объектах и натуральных изделиях с различным исходным уровнем структурного упрочнения при испытаниях на статическое одноосное растяжение.*Результаты.* Подтверждены и получены новые данные по количественному влиянию единичных надрезов и системы надрезов при различном исходном уровне структурного упрочнения объектов, не имеющих единичных надрезов и системы надрезов, причем установлено, что если для единичных надрезов с ростом структурного упрочнения в исследованных пределах – значение эффекта упрочнения в надрезе также увеличивается, то для системы надрезов влияние уровня структурного упрочнения экстремально: эффект упрочнения внадрезе сначала растет, а затем уменьшается. Предложены объяснения наблюдаемым в экспериментах влияниям различных факторов на эффект упрочнения в надрезе, обобщенных в соответствующем выражении.*Научная новизна.* Впервые показано и истолковано неоднозначное влияние системы надрезов, по сравнению с единичным надрезом, на эффект упрочнения в надрезе при различных уровнях структурного упрочнения: в случае единичного надреза геометрическое упрочнение в общем фиксируемом эффекте упрочнения в надрезевыступает как сомножитель со структурным упрочнением, а в случае системы надрезов при определенном уровне структурного упрочнения влияние надрезов оказывается разупрочняющим фактором. Впервые также формализовано влияние различных факторов на эффект упрочнения в надрезе в виде уравнения, не противоречащем экспериментальным данным.*Практическая значимость.* На основе полученных результатов разработаны рекомендации по корректировке типа объектов, подвергаемых статочным испытаниям, в частности болтов классов прочности 8.8 и выше. Они же могут быть использованы для оптимизации геометрии системы надрезов металлоизделий, имеющих функциональные надрезы, а также в общем направлении конструирования объектов с положительным использованием эффекта упрочнения в надрезе.

*Ключевые слова:* единичный надрез, система надрезов, упрочнение в надрезе, коэффициент концентрации напряжений, степень жесткости напряженного состояния, уровень структурного упрочнения

## ЭФФЕКТ "ЗМІЦНЕННЯ В НАДРІЗІ" ПРИ ОДИНИЧНОМУ НАДРІЗІ І СИСТЕМІ НАДРІЗІВ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ВИХІДНОГО РІВНЯ МІЦНОСТІ

ГУЛЬ Ю. П.<sup>1</sup>, к.т.н., доц.

ІВЧЕНКО 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 аналітичного і експериментальних досліджень виявити та узагальнити закономірності кількісного впливу геометрії надрізів і – особливо системи надрізів і рівня вихідної міцності – на величину ефекту зміцнення в надрізі. **Методика.** Аналітичні дослідження щодо систематизації літературних даних про кількісний вплив різних факторів на ефект зміцнення в надрізі в зіставленні з експериментальними даними впливу одиничних надрізів і системи надрізів різної геометрії на модельних об'єктах і натурних виробках з різним вихідним рівнем структурного зміцнення при випробуваннях на статичну зону розтягнення. **Результати.** Підтвержені і отримані нові дані щодо кількісного впливу одиничних надрізів і системи надрізів при різному вихідному рівні структурного зміцнення об'єктів, що не мають одиничних надрізів і системи надрізів, причому встановлено, що якщо для одиничних надрізів з зростанням структурного зміцнення в досліджених межах – значення ефекту зміцнення в надрізі також збільшується, то для системи надрізів вплив рівня структурного зміцнення екстремально: ефект зміцнення в надрізі спочатку зростає, а потім зменшується. Запропоновано пояснення спостережуваних в експериментах впливів різних факторів на ефект зміцнення в надрізі, узагальнених у відповідному рівнянні. **Наукова новизна.** Вперше показано і витлумачено неоднозначний вплив системи надрізів, в порівнянні з одиничним надрізом, на ефект зміцнення в надрізі при різних рівнях структурного зміцнення: у випадку одиничного надрізу геометричне зміцнення загалом фіксується ефект зміцнення в надрізі виступає як співмножник по структурному зміцненню, а в разі систем надрізів при певному рівні структурного зміцнення вплив надрізів виявляється знецінюючим фактором. Вперше формалізовано вплив різних факторів на ефект зміцнення в надрізі у вигляді рівняння, що не суперечить експериментальним даним. **Практична значимість.** На основі отриманих результатів розроблені рекомендації щодо коригування типу об'єктів, що піддаються здавальним випробуванням, зокрема болтів класів міцності 8.8 і вище. Вони можуть бути використані для оптимізації геометрії системи надрізів металовиробів, що мають функціональні надрізи, а також в загальному напрямку конструювання об'єктів з позитивним використанням ефекту зміцнення в надрізі.

*Ключові слова:* одиничний надріз, система надрізів, зміцнення в надрізі, коефіцієнт концентрації напруг, ступінь жорсткості напруженого стану, рівень структурного зміцнення

## THE EFFECT OF “HARDENING IN THE CUT” WITH A SINGLE INCISION AND CUTS DEPENDING ON THE INITIAL LEVEL OF STRENGTH

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, ORCID 0000-0002-4518-1744

<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 analytical and experimental studies to identify and summarize quantitative regularities of the influence of geometry of cuts and especially of the system of cuts and the source strength to the magnitude of the hardening effect in the incision. **Methodology.** Analytical study on the systematization of literature data on the quantitative influence of different factors on the hardening effect in the incision in comparison with experimental data influence of single cuts and a system of notches of different geometry objects in model and full-scale products with different level of structural hardening when tested in a static uniaxial tensile tests. **Findings.** Confirmed and obtained new data on the quantitative impact of single cuts and systems of cuts at different initial level of structural hardening of the facilities that do not have single cuts and system cuts, and found that when a single cuts with the growth of structural hardening in the investigated range – the value of the hardening effect in the incision increases, the system cuts the influence of the level of extreme structural hardening: the hardening effect in the incision first increases and then decreases. The proposed explanation of observed in experiments effects of various factors on the effect of hardening in the cut, in the corresponding generic expression. **Originality.** First shown and interpreted an ambiguous impact of the system of cuts, compared with a single incision, the hardening effect of the incision at different levels of structural hardening: in the case of a single incision geometric hardening in the overall fixed effect of hardening in the notch acts as a cofactor for structural hardening, as in the case of a system of cuts at a certain level of structural hardening effect of the cuts is again reinforcing factor. Also for the first time formalized the influence of various factors on the hardening effect in the incision in the form of equations that do not contradict to experimental data. **Practical value.** On the basis of the results developed recommendations for updating the object type subjected to acceptance tests, in particular bolts in classes 8.8 and higher. They can be used to optimize the geometry of the system cuts metal with functional cuts, and in general creating objects with positive use of the hardening effect in the incision.

**Keywords:** a single cut, the system of cuts, hardening in the cut, the stress concentration factor, the degree of stiffness of the stress state, the level of structural hardening

## Введение

В значительном количестве работ приведены экспериментальные данные, их обобщенный анализ и теоретические предпосылки влияния надрезов (Н) как мест локального изменения поперечного сечения нагружаемого объекта (НО) на его механические свойства [1, 2, 4-8, 10-12]. Указанное влияние трактовалось на основе получения концентрации напряжений ( $K_t$ ) и изменения степени жесткости напряженного состояния в области надреза ( $\beta_n$ ). Исследовалось преимущественно влияние единичных надрезов (ЕН), хотя еще в основополагающей работе Нейбера [5] были показаны особенности влияния системы надрезов (СН), да и для многих распространенных металлоизделий (например, крепежные резьбовые элементы, арматура с периодическим профилем) их функциональные надрезы (ФН) представляют именно СН.

Кроме этого, почти нет системных количественных исследований влияния геометрических параметров как ЕН, так и СН на эффект упрочнения в надрезе (ЭУН), причем влияния именно  $\beta_n$ , как функции указанных параметров. Показательно, что в одной из немногих системных работ по исследованию количественного влияния радиуса Н на ЭУН реальных сплавов – величина ЭУН представляется в зависимости от  $K_t$ , но не  $\beta_n$  (!) [1]. В известных работах не учитывается и такой важный фактор, как доля поперечного сечения НО, где  $\beta_n > \beta_0$  (степени жесткости напряженного состояния НО без Н).

Практически не учтено потенциально вполне возможное влияние и уровня структурно упрочнения (СУ) на ЭУН, так как и любая степень СУ, так и влияние Н в НО связаны со сдвигом атомов из равновесных положений, почему взаимодействие соответствующих полей напряжений представляется неизбежным. В уже упомянутой работе [1] обсуждаемое влияние присутствует более, чем наглядно, но авторы работы пишут о “превалирующем влиянии геометрических факторов на закономерность повышения величины” ЭУН. Недостаточный учет всех факторов, влияющих на величину ЭУН предопределяет и отсутствие до сего времени формализации зависимости ЭУН от влияющих факторов. В данной работе на основе рассмотрения и обоснования более полной, чем ранее, совокупности влияющих факторов предлагается вариант формализации зависимости ЭУН от этих факторов в форме уравнения, качественно не противоречащего данным экспериментов.

## Цель

На основе аналитических и экспериментальных исследований определить новую совокупность факторов, влияющих на величину ЭУН, и формализовать закономерности этого влияния в виде уравнения, качественно не противоречащего экспериментальным данным.

### Методика

Общая методика исследований заключалась в сопоставлении характеристик сопротивления деформации при одноосном статическом растяжении – пределов текучести ( $\sigma_{0,2}$ ) и прочности ( $\sigma_b$ ), определяемых на НО в виде модельных объектов (МО) без ЕН или СН и в виде МО с ЕН или СН. За величину ЭУН принимали значения разницы  $\sigma_{0,2}^H - \sigma_{0,2}^Г = \Delta\sigma_{н}^Г$  или  $\sigma_b^H - \sigma_b^Г = \Delta\sigma_{н}^B$ , причем в определенных условиях значения  $\Delta\sigma_{н}^Г$  и  $\Delta\sigma_{н}^B$  могут быть и отрицательными: эффект разупрочнения в надрезе. Для определения указанных выше величин использовали как литературные [1, 11], так и нами полученные данные. Использовали призматические и цилиндрические МО с соответственно боковыми и кольцевыми ЕН. Влияние глубины Н и СН исследовали на призматических МО. Основные эксперименты по влиянию СН при различных уровнях СУ проводили на натуральных изделиях, которыми служили полноразмерные болты М12 и обточенные (с удалением резьбы) образцы из низкоуглеродистых и низколегированных сталей. Исследованные уровни СУ в этом случае лежали в интервале 400 ... 1100 МПа, а исследованный интервал СУ для ЕН, в том числе по литературным данным, составлял от 150 до 1500 МПа.

Значения теоретического коэффициента концентрации напряжений определяли по уравнению

$$K_t = 1 + a \sqrt{\frac{l_n}{\rho}} \quad (1)$$

где  $a$  – некоторый безразмерный коэффициент,  $l_n$  и  $\rho$  – соответственно глубина и радиус закругления дна надреза [5, 6, 12], а значение  $\beta_n$  – по модифицированному нами выражению из работы [3]:

$$\beta_n = \beta_0 + \frac{d_x}{\rho} \quad (2)$$

где  $\beta_0$  – степень жесткости напряженного состояния МО без Н, а  $d_x$  – наименьший диаметр или толщина поперечного сечения в месте Н. Значение  $\beta_0$  при одноосном растяжении равно 2.

### Результаты

На рис. 1 представлено влияние глубины надреза  $l_n$  на ЭУН по  $\Delta\sigma_{н}^Г$ , который линейно возрастает с ростом  $l_n$  в 7 раз – примерно в 3,7 раза, т.е. заметно меньше, чем увеличивается  $l_n$ . Для цилиндрических образцов из другой стали с ростом  $l_n$  при сохранении  $\rho = \text{const}$  получены подобные результаты [10].

Исходя из уравнений (1) и (2), значения  $K_t$  [разупрочняющий фактор (РФ)] должны возрасти в  $\sqrt{l_n}$  – раза, значения  $\beta_n$  [упрочняющий фактор (УФ)] должны уменьшиться, благодаря уменьшению  $d_x$ . Следовательно, в формировании ЭУН должен участвовать дополнительный УФ, который перекрывает рост РФ ( $K_t$ ) и уменьшение УФ ( $\beta_n$ ).

Логично полагать, что таким дополнительным УФ для ЭУН может быть увеличение доли поперечного сечения с  $\beta_n > \beta_0$ , которая увеличивается пропорционально росту  $l_n$ .

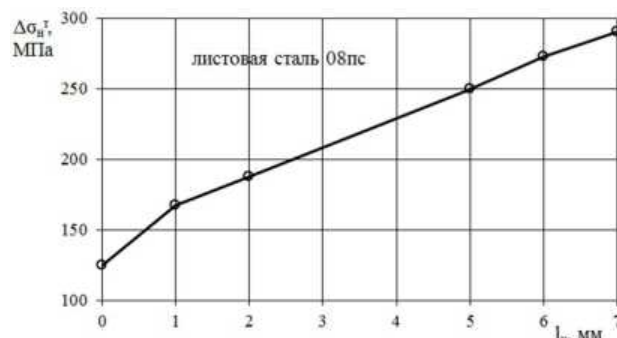


Рисунок 1 – Влияние глубины надреза при постоянном радиусе закругления его дна (2,5 мм) на эффект упрочнения в надрезе / Effect of depth of cut at a constant radius of curvature of its bottom (2.5 mm) on the hardening effect in the notch

Таким образом, следует учитывать для ЭУН такой упрочняющий фактор как отношение площади под Н с  $\beta_n > \beta_0$  –  $F^*$  ко всей площади сечения под Н –  $F_n$ :  $F^*/F_n = f(l_n)$  при прочих равных условиях.

На рис. 2 с использованием первичных экспериментальных данных работы [1] представлена зависимость ЭУН по  $\Delta\sigma_{н}^B$  от нового предлагаемого фактора  $\beta_n/K_t$ , учитывающего в первом приближении одновременно влияние как УФ –  $\beta_n$ , так и РФ –  $K_t$ .

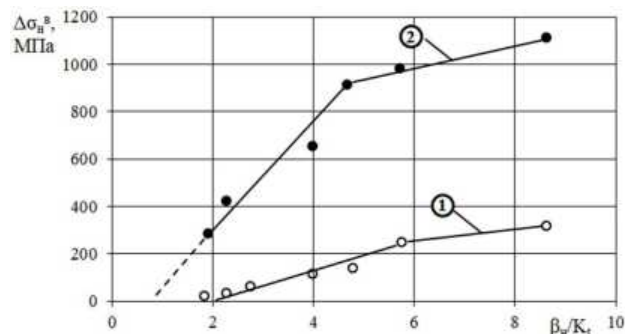


Рисунок 2 – Изменение уровня упрочнения в надрезе с ростом отношения степени жесткости напряженного состояния к теоретическому коэффициенту концентрации напряжений при различном структурном упрочнении в исходном состоянии: 1 –  $\sigma_0 = 530$  МПа; 2 –  $\sigma_0 = 1530$  МПа / Changes in the level of strengthening in the notch with increasing ratio severity state of tension to the theoretical stress concentration factor at different structural hardening in the initial state: 1 –  $R_m = 530$  МПа; 2 –  $R_m = 1530$  МПа

Наблюдаются два участка линейной зависимости  $\Delta\sigma_{н}^B = f(\beta_n/K_t)$ , причем второй говорит о наличии уменьшения увеличения ЭУН с ростом  $\beta_n/K_t$  и необходимости в дальнейшем корректировки данного фактора или учета влияния других. В то же время зависимости на рис. 2 наглядно

демонстрируют сильное влияние уровня СУ на величину ЭУН: при максимальных абсолютных значениях  $\Delta\sigma_n$  рост СУ  $\sim$  в 3 раза примерно во столько же увеличивает ЭУН – с 330 МПа до 1100 МПа, а при меньших значениях  $\beta_n/K_t$  рост ЭУН значительно опережает относительное увеличение уровня СУ. Данные, приведенные на рис. 3, полностью подтверждают весьма существенное влияние исходного уровня СУ на ЭУН. Таким образом, третьим УФ в ЭУН следует считать уровень исходного СУ, который предлагается формализовать как значение предела текучести в терминах касательных напряжений  $\tau_r$ .

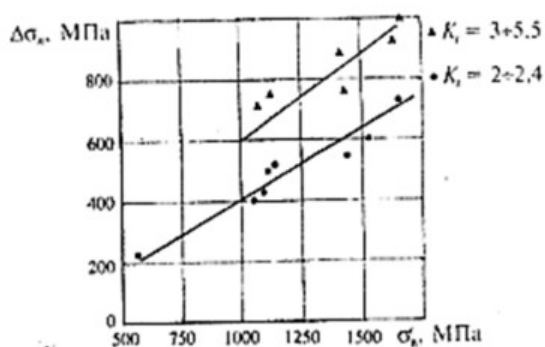


Рисунок 3 – Влияние уровня исходной прочности ( $\sigma_0$ ) на увеличение эффекта упрочнения в надрезе ( $\Delta\sigma_n$ ) по полученным нами и обработанным данным, приведенным в работе [11] / Impact of initial strength ( $R_m$ ) to increase the effect of hardening in the notch ( $\Delta\sigma_n$ ) received usand processed by the data presented in the paper [11]

С переходом от ЕН к СН ситуация с факторами, определяющими ЭУН, осложняется необходимостью рассматривать взаимодействие полей напряжений (ВПН), возникающих в НО у отдельных Н в СН, между собой с различными результатами такой интерференции [5, 6, 12]. Вполне очевидно, что результат ВПН зависит от геометрии отдельных Н, расстояния между ними и – по видимому- от числа Н на единицу длины НО [1, 2, 6, 12]. Формализовано результат ВПН можно описать через величину коэффициентов  $\gamma$  и  $\beta_n$ :  $z\beta_n/\gamma K_t$ , причем  $z$  и  $\gamma$  могут быть как меньше, так и больше единицы, а также неодинаково изменяться для  $K_t$  и  $\beta_n$ .

Например из рис. 4 следует, что переход от ЕН к СН из 6 ЕН полностью устраняет ЭУН и даже несколько разупрочняет НО с СН по сравнению с НО без Н. Следовательно, можно считать, что ВПН привело к такому снижению  $z$ , по сравнению с  $\gamma$ , при котором РФ ( $K_t$ ) превзошел влияние УФ ( $\beta_n$ ). Поскольку функциональные Н в различных металлоизделиях часто существуют как СН, то особенно актуальным для ЭУН при СН является влияние уровня СУ, которое, как было показано выше, весьма существенно при ЕН. В случае СН рассматриваемое влияние также имеет место, но упрочняющим оно оказывается только до

определенного уровня СУ, а затем становится разупрочняющим (см. рис. 5).

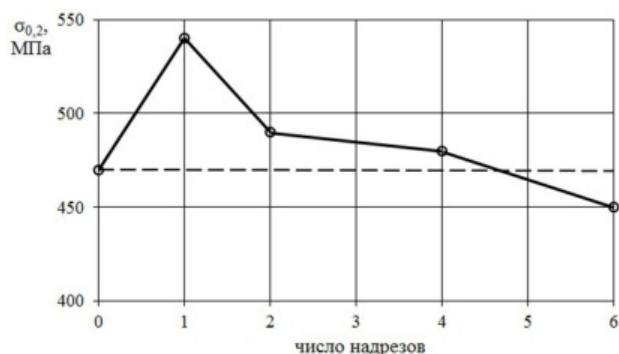
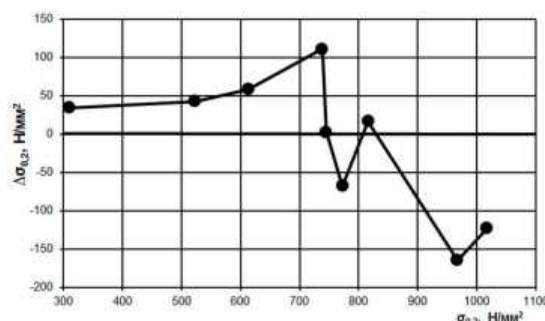
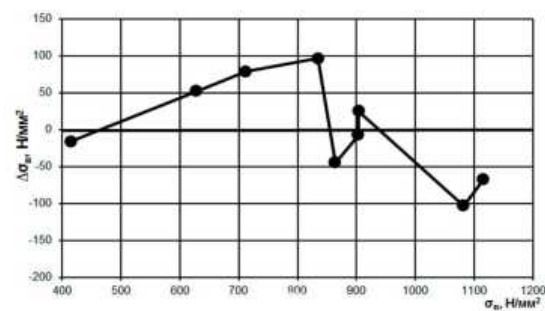


Рисунок 4 – Влияние числа надрезов на предел текучести листовой стали 08пс, упрочненной холодной деформацией с последующим старением при 400 °С / Influence of the number of notches on the leaf yield strength steel 08ps, hardened by cold deformation followed by aging at 400 °С



а



б

Рисунок 5 - Зависимость разницы между пределами текучести (а) и пределами прочности (б) готовых болтов и обточенных образцов в зависимости от уровня упрочнения по пределу текучести (а) и пределу прочности (б) / The dependence of the difference between the yield points (a) and tensile strengths (b) finished bolt and peeled samples depending on hardening on yield strength level (a) tensile strength and (b)

Установленное разупрочняющее влияние СН, зависящее от уровня СУ, следует связывать не только с ВПН, создаваемых Н в НО, но и с полями напряжений, создаваемых уровнем упрочнения. Таким образом, связанное с переходом от ЕН к СН – ВПН в НО может кардинально изменять характер

влияния на ЭУН ряда факторов, особенно с повышением уровня СУ и – соответственно – увеличением степени неравновесности структурного состояния.

На основе вышеизложенного можно предложить в первом приближении уравнение, обобщающее влияние рассмотренных факторов на ЭУН и для ЕН и СН:

$$\Delta\sigma_n = \tau_m \frac{F^*}{F_n} \left[ \frac{z\beta_n}{\gamma K_t} - \beta_0 \right] \quad (3)$$

Входящие в уравнение (3) величины раскрыты выше. При ЕН  $z=1$  и  $\gamma=1$ , а при СН  $z\neq 1$  и  $\gamma\neq 1$ , причем обычно  $z<1$  и  $\gamma<1$ .

Уравнение (3) можно применять не только для истолкования того или иного влияния ЕН и СН на ЭУН, но и для оптимизации геометрии ЕН и СН в сочетании с уровнем СУ при использовании ЭУН для металлоизделий, имеющих системы функциональных Н, с целью повышения их конструктивной прочности [7, 9, 13].

#### Научная новизна и практическая ценность

Впервые показано и истолковано неоднозначное влияние системы надрезов, по сравнению с единичным надрезом, на эффект упрочнения в надрезе при различных уровнях структурного упрочнения: в случае единичного надреза геометрическое упрочнение в общем фиксируемом эффекте упрочнения в надрезе выступает как множитель со структурным упрочнением, а в случае системы надрезов при определенном уровне структурного упрочнения влияние надрезов оказывается разупрочняющим фактором. Экстремальное влияние уровня структурного упрочнения на уровень сопротивления пластической деформации следует связывать с результатом интерференции полей напряжений, возникающих как у надрезов в нагружаемом объекте, так и полей напряжений, определяемых уровнем структурного упрочнения. Впервые также формализовано влияние различных факторов на эффект упрочнения в надрезе

в виде уравнения, не противоречащем экспериментальным данным.

На основе полученных результатов разработаны рекомендации по корректировке типа объектов, подвергаемых сдаточным испытаниям, в частности болтов классов прочности 8.8 и выше. Они же могут быть использованы для оптимизации геометрии системы надрезов металлоизделий, имеющих функциональные надрезы, а также в общем направлении конструирования объектов с положительным использованием эффекта упрочнения в надрезе.

#### Выводы

1. На основе анализа и обобщения научных предпосылок и экспериментальных данных по природе ЭУН и факторов, влияющих на этот эффект, кроме известных факторов геометрии надреза, предложены новые факторы: отношение степени жесткости напряженного состояния к коэффициенту концентрации напряжений, относительная доля поперечного сечения НО под Н с повышенной степенью жесткости напряженного состояния по сравнению с таковой для НО без Н, и исходный уровень СУ НО, что подтверждено экспериментально.

2. Показано, что количественное влияние СН на ЭУН может существенно отличаться от влияния ЕН вследствие взаимодействия полей напряжений у отдельных Н НО и при превышении определенного уровня СУ влияние СН становится разупрочняющим.

3. Впервые предложено уравнение для ЭУН для ЕН и СН, обобщающее влияние известных и новых факторов, которое не противоречит экспериментальным данным и может быть использовано для оптимизации влияющих факторов на ЭУН в металлоизделиях с целью повышения их конструктивной прочности.

4. Предложены рекомендации по корректировке сдаточных испытаний металлоизделий, имеющих систему функциональных надрезов, на основе закономерности их влияния на ЭУН.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Водопьянов В.И., Кондратьев О.В. Влияние концентрации напряжений на прочность и пластичность конструкционных материалов // Проблемы прочности. – 1991. - №3. – с. 74 – 78.
2. Гуль Ю.П. Основные принципы и практика геометрически-структурного упрочнения металлоизделий // Сталь. – 2012. - №8. – с. 40 – 45.
3. Колмогоров В.Л. Пластичность и разрушение. – М.: Металлургия, 1977. – 355 с.
4. Махмутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов на прочность. – М.: Машиностроение, 1981. – 272с.
5. Нейбер Г. Концентрация напряжений. – М.: ОГИЗ, 1947. – 205с.
6. Петерсон Р. Коэффициенты концентрации напряжений. – М.: Мир, 1977. – 300с.
7. Pedersen N. L. Optimization of Bolt Stress // 10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2013. - p. 142-148
8. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. – Киев: Наукова думка, 1988. – 736 с.

9. Різбовий кріпильний елемент: пат. 103677 Україна: МПК F16B 35/00 / Гуль Ю.П., Івченко О.В., Кондратенко П.В., Чмельова В.С., Перчун Г.І.; заявник та власник НМетАУ. - №u201506182; заяв. 23.06.2015; опубл. 21.12.2015, бюл. №24/2015. – 7с.
10. Херцберг Р.В. Деформация и механика разрушения конструкционных материалов. – М.: Metallurgiya, 1989. – 589с.
11. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Ч.2. – М.: Машиностроение, 1974. – 367с.
12. Walter D. Peterson's stress concentration factors. – New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2008. – 555 p.
13. Wiegand H., Strigens P. Die Haltbarkeit von Schraubverbindungen mit Feingewinden bei wechselseitiger Beanspruchung // ind.-Anz. – 1970. - №91. – pp. 2139 – 2144.

## REFERENCES

1. Vodopyanov V.I., Kondratev O.V. *Vliyanie kotsentratsii napryazheniy na prochnost i plastichnost konstruksionnyih materialov* [The effect of stress concentration on the strength and ductility of structural materials] // Problems of strength. – 1991. - №3. – pp. 74 – 78. (in Russian).
2. Gul'Yu.P. *Osnovnyie printsipy i praktika geometricheski-strukturnogo uprochneniya metallozdeliy* [Basic principles and practice geometric-structural hardening of metal] // Steel. - 2012. - №8. – pp. 40 – 45. (in Russian).
3. Kolmogorov V.L. *Plastichnost i razrushenie* [Plasticity and fracture]. – Moscow: Metallurgy, 1977. – 355 p. (in Russian).
4. Mahmutov N.A. *Deformatsionnye kriterii razrusheniya i raschet elementov na prochnost* [Deformation criteria destruction and calculation of elements of strength]. – Moscow: Mechanical, 1981. – 272 p. (in Russian).
5. Neyber G. *Kotsentratsiya na pryazheniy* [Stress concentration] – Moscow: OGIZ, 1947. – 205 p. (in Russian).
6. Peterson R. *Koeffitsienty kotsentratsii napryazheniy* [The coefficients of stress concentration]. – Moscow: Mir, 1977. – 300 p. (in Russian).
7. Pedersen N. L. Optimization of Bolt Stress // 10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2013. - p. 142-148
8. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov* [Handbook on strength of materials]. – Kiev: Naukova Dumka, 1988. – 736 p. (in Russian).
9. *Rizbovyy kripilnyy element* [A threaded fastening element]: pat. 103677 Ukraine: MPK F16B 35/00 / Gul'Yu.P., Ivchenko O.V., Kondratenko P.V., Chmelova V.S., Perchun G.I.; the applicant and owner NMetAU. - №u201506182; appl. 23.06.2015; publ. 21.12.2015, bul. №24/2015. – 7s. (in Ukrainian).
10. Hertsberg R.V. *Deformatsiya i mehanika razrusheniya konstruksionnyih materialov* [Deformation and fracture mechanics of structural materials]. – Moscow: Metallurgy, 1989. – 589 p. (in Russian).
11. Fridman J. B. *Mehanicheskie svoystva metallov* [Mechanical properties of metals. P. 2]. – Moscow: Mechanical, 1974. – 367 p. (in Russian).
12. Walter D. Peterson's stress concentration factors. – New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2008. – 555 p.
13. Wiegand H., Strigens P. Die Haltbarkeit von Schraubverbindungen mit Feingewinden bei wechselseitiger Beanspruchung // ind.-Anz. – 1970. - № 91. – pp. 2139 – 2144.

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