

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 620.17:62 – 229.312

Ю. П. ГУЛЬ<sup>1</sup>, А. В. ИВЧЕНКО<sup>2\*</sup>, П. В. КОНДРАТЕНКО<sup>3\*</sup>, Г. И. ПЕРЧУН<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Термическая обработка металлов», Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепропетровск, Украина, 49600, тел. +38 (0562) 46 24 53, эл. почта kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua, ORCID 0000-0003-3754-7731

<sup>2\*</sup>Каф. «Термическая обработка металлов», Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепропетровск, Украина, 49600, тел. +38 (0562) 46 24 53, эл. почта armst\_2000@mail.ru, ORCID 0000-0002-4518-1744

<sup>3\*</sup>Каф. «Термическая обработка металлов», Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепропетровск, Украина, 49600, тел. +38 (0562) 46 24 53, эл. почта Achriman@yandex.ua, ORCID 0000-0003-2242-3496

<sup>4\*</sup>Каф. «Термическая обработка металлов», Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепропетровск, Украина, 49600, тел. +38 (0562) 46 24 53, эл. почта kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua, ORCID 0000-0001-9013-4659

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОМПЛЕКСА МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ГОТОВЫХ БОЛТОВ И ОБТОЧЕННЫХ ОБРАЗЦОВ

**Цель.** Работа направлена на анализ экспериментальных результатов при испытаниях на растяжение готовых болтов и обточенных образцов с использованием принципов геометрически-структурного упрочнения (ГСУ) металлоизделий. **Методика.** Испытания на одноосное растяжение проводились на полноразмерных болтах и обточенных образцах до диаметров 10 и 8 мм на испытательной машине FP – 100/1 с записью полной диаграммы деформации и разрушения. **Результаты.** Установлено, что уровень прочности качественно и количественно оказывает различное влияние на соотношение характеристик сопротивления пластической деформации, характеристик пластичности и сопротивления вязкому разрушению, определяемых на болтах и обточенных образцах. Проведенный анализ полученных результатов показал, что комплекс механических свойств, определяемый при испытаниях готовых болтов, более адекватен их механическому поведению при эксплуатации, чем исследования на обточенных образцах. Приведенные объяснения особенно важны для сдаточных испытаний болтов класса прочности 8.8 и выше. **Научная новизна.** Впервые экспериментально показано, что система функциональных надрезов на конкретных металлоизделиях может оказывать как упрочняющее, так и разупрочняющее влияние на характеристики сопротивления пластической деформации. Дано объяснение наблюдаемого феномена на основе изменения соотношения показателя концентрации напряжений и степени жесткости напряженного состояния в области надрезов. **Практическая значимость.** Ограничение механических испытаний только готовыми болтами, кроме получения большего соответствия определяемых свойств болтов их конструктивной прочности при эксплуатации, способствует уменьшению общей длительности и трудоемкости испытаний в целом.

**Ключевые слова:** высокопрочные болты; готовые болты; обточенные образцы; испытания на растяжение; механические свойства; надрез

#### Введение

Известно, что болтовые соединения узлов машин и конструкций являются одним из ос-

новных типов соединений, в том числе и для оборудования железнодорожного транспорта [1, 5, 7, 9, 13]. Указанный тип соединений успешно конкурирует со сварными соединения-

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

ми, особливо при високому рівні упрочнення матеріала з'єднуюваних вузлів. При цьому реалізується експлуатаційна міцність болтів як основної частини болтового з'єднання суттєво впливає на конструктивну міцність (КП) всього агрегата. По тому для болтів, як впрочем і для будь-якого іншого виробу, важна ступінь коректності методики вступних випробувань з урахуванням умов навантаження при експлуатації.

Діючими стандартами передбачено, як одне з основних, випробування на одностороннє розтягнення об'єктів двох типів: готових болтів і обточених (з видаленням різьби) гладких зразків. Як ні дивно з позицій основних положень КП, але результати саме останніх випробувань передбачається використовувати при розрахунках болтових з'єднань, що не враховує фактичне впливання на комплекс механічних властивостей готових болтів функціональних надрізів (різьби). Вказане впливання визначає дію надрізу, як концентратора напружень в прилеглих об'єктах об'єкта, що широко відомо, так і фактора, змінює ступінь жорсткості напруженого стану в тих же об'єктах, що відомо в меншій ступені. По тому наявність надрізу (надрізів) може призводити як до ефекту додаткового упрочнення в межах нормальних напружень, так і до ефекту розупрочнення, порівняно з результатами, отриманими на гладких зразках [2, 12]. Однак, впливання рівня упрочнення на отримання ефектів упрочнення або розупрочнення при наявності надрізів не досліджено.

Дослідженням в цьому напрямку по болтам присвячені небагато численні роботи [3, 6, 10], причому в роботах [3, 10] впливання різьби на властивості встановлено, а автори роботи [6] таке впливання заперечують, хоча наведені в цій же роботі дані свідчать про протилежне. В цілому можна зробити висновок, що систематичні дослідження по доступній інформації в обговорюваному напрямку відсутні.

**Цель**

Ціллю роботи є аналіз експериментальних результатів при випробуваннях на розтягнення готових болтів і обточених зразків,

з використанням принципів геометрично-структурного упрочнення (ГСУ) металевих виробів [2].

**Методика**

В якості матеріала використовували болти розмірами М12х1,75х80 мм, М12х1,75х70 мм, М12х1,5х80 мм, М12х1,75х100 мм з низькоуглеродистих і низьколегированих сталей, отримані холодною висадкою, термічної обробкою за стандартними технологіями металургічних підприємств і за експериментальними режимами для отримання механічних властивостей в інтервалі 4.8–10.9 класів міцності (табл. 1).

Таблиця 1

**Характеристики досліджуваних болтів**

Table 1

**Characteristics of the bolts**

Размер, мм	Класс прочности	Марка стали	Обработка
М12х1,75х80	4.8	15кп	холодная объемная штамповка (ХОШ) + отпуск 600 °С
М12х1,75х80	6.8	15кп	холодная объемная штамповка
М12х1,75х80	6.8	Ст3пс	термическое упрочнение + ХОШ
М12х1,75х80	8.8	20Г2	термическое упрочнение + ХОШ + деформационное старение при 300 °С
М12х1,75х80	8.8	10Г2	ХОШ + термическое упрочнение (закалка + отпуск 420 °С)
М12х1,75х70	8.8	Ст5пс	ХОШ + термическое упрочнение

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Окончание табл. 1

End of table 1

Размер, мм	Класс прочности	Марка стали	Обработка
M12x1,75x80	8.8	20Г	ХОШ + термическое упрочнение (закалка + отпуск 420 °С)
M12x1,5x80	10.9	30Г2	ХОШ + термическое упрочнение (закалка + отпуск 420 °С)
M12x1,75x100	10.9	30Г1Р	ХОШ + термическое упрочнение (закалка + отпуск 420 °С)

Испытания на одноосное растяжение проводили как на готовых болтах, так и на обточенных до диаметров 10–8 мм образцах с полным удалением резьбы. Использовали машину типа FP – 100/1, испытываемые образцы размещали в специальных захватах. Испытания проводили при скорости перемещения захватов 1 мм/мин с записью полной диаграммы растяжения. Кроме стандартных характеристик, оценивали равномерное удлинение как характеристику перехода к макролокализации пластической деформации [4]. Условную характеристику скорости падения напряжения на участке локализованной деформации определяли как отношение падения номинального напряжения ( $\Delta\sigma_{ном}$ ) от ее максимального значения до значения соответствующего моменту разрушения к величине удлинения на этом участке диаграммы ( $\delta_{лок}$ ). Тип разрушения при указанных испытаниях определяли по виду диаграмм растяжения и характеру макроповерхности разрушения.

Анализ механических характеристик, полученных на готовых болтах и обточенных образцах, осуществляли для соответствующих уровней упрочнения. Для объяснения различий в прочностных характеристиках использовали теоретическое значение коэффициента концентрации напряжений [8, 15].

## Результаты

Свойства, полученные при растяжении готовых болтов и обточенных образцов, приведены в табл. 2 и 3, а зависимости на рис. 1–3 иллюстрируют влияние уровня упрочнения на качественные (знак) и количественные различия механических характеристик готовых болтов и обточенных образцов.

Как следует из зависимостей, представленных на рис. 1, влияние уровня упрочнения на соотношение пределов прочности и текучести готовых болтов и обточенных образцов можно разделить на два интервала.

Таблица 2

## Механические свойства готовых болтов

Table 2

## Mechanical properties of the finished bolts

Марка стали	Класс прочности	$\sigma_{0,2}$ , Н/мм <sup>2</sup> /%	$\sigma_E$ , Н/мм <sup>2</sup> /%
15кп	4.8	310	415
15кп	6.8	523	628
Ст3пс	6.8	613	712
20Г2	8.8	738	835
Ст5пс	8.8	745	904
10Г2	8.8	773	864
20Г	8.8	816	903
30Г1Р	10.9	967	1 082
30Г2	10.9	1 017	1 116

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Окончание табл. 2

End of table 2

Марка стали	$\sigma_p, \%$	$\sigma_{\text{общ}}, \%$	$\frac{\Delta\sigma_{\text{ком}}}{\delta_{\text{лок}}}, \text{ Н/мм}^2/\%$
15кп	11,1	19	14,3
15кп	6,15	10,8	32,3
Ст3пс	5,53	10,7	37,73
20Г2	7,23	11,8	46,4
Ст5пс	6,39	10,5	58,3
10Г2	6	11	59,82
20Г	6,49	10	56,4
30Г1Р	6,62	9,7	95,89
30Г2	6,56	11	94,69

В интервалах значений предела прочности до  $800 \text{ Н/мм}^2$  и предела текучести примерно до  $700 \text{ Н/мм}^2$  более высокие значения рассматриваемых характеристик фиксируются при испытаниях готовых болтов, а выше указанных границ – для обточенных образцов.

Дополнительно нанесенные на рис. 1 значения, соответствующие данным работы [6], хорошо согласуются с указанными интервалами. Наблюдаемые максимальные различия в характеристиках сопротивления пластической деформации могут достигать  $150\text{--}200 \text{ Н/мм}^2$ , что значительно превышает ошибку эксперимента. На основании этого может происходить неоправданный перевод испытываемого образца в иной класс прочности.

Таблица 3

Механические свойства обточенных образцов

Table 3

Mechanical properties of the machined samples

Марка стали	Класс прочности	$\sigma_{0,2}, \text{ Н/мм}^2$	$\sigma_E, \text{ Н/мм}^2$
15кп	4.8	275,5	431
15кп	5.8	480	576
Ст3пс	6.8	554,5	633,5
20Г2	6.8	627	738,5
Ст5пс	8.8	742,5	879
10Г2	8.8	840,5	909
20Г	8.8	799,5	910,5
30Г1Р	10.9	1 131,5	1 185
30Г2	10.9	1 140	1 183

Окончание табл. 3

End of table 3

Марка стали	$\sigma_p, \%$	$\sigma_{\text{общ}}, \%$	$\frac{\Delta\sigma_{\text{ком}}}{\delta_{\text{лок}}}, \text{ Н/мм}^2/\%$
15кп	21	33	12,61
15кп	6,1	13,74	20,39
Ст3пс	6,4	15,03	26,16
20Г2	8,8	17,53	32,77
Ст5пс	9,9	15,85	41,51
10Г2	9,4	17,03	47,78
20Г	9,1	16,76	43,14
30Г1Р	9,3	13,12	69,71
30Г2	8,2	14,43	73,6

Согласно полученным экспериментальным данным по испытаниям обточенных образцов, расчет высокопрочных болтов для случая  $\sigma_e \geq 800 \text{ Н/мм}^2$  приведет к получению завышенных результатов по сравнению с фактическими для готовых болтов. В результате получим искаженные представления относительно

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

надежности и долговечности их при эксплуатации. С другой стороны, использование данных, полученных на обточенных образцах для классов прочности первого интервала (рис. 1), приводит к противоположному по характеру эффекту – получению заниженных данных. В этом случае при использовании готовых болтов получаем неоправданный перерасход металла.

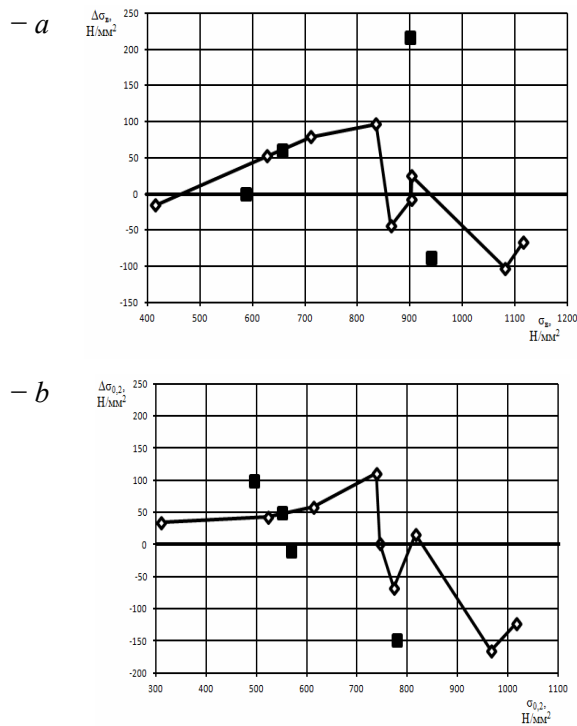


Рис. 1. Зависимость разницы между пределами прочности (а) и пределами текучести (б) для готовых болтов и обточенных образцов от уровня упрочнения по пределу прочности (а) и пределу текучести (б):

■ – точки, полученные обработкой данных работы [6]

Fig. 1. The dependence of the difference between the tensile strengths (a) and yield stress (b) for the finished bolts and weltd samples from the level of the hardening by tensile strength (a) and yield stress (b)

■ – points obtained by processing data of work [6]

Использование принципов геометрически-структурного упрочнения позволило объяснить влияние надреза или системы надрезов на прочностные характеристики металла готовых болтов.

Изменение прочностных характеристик на пример, предела текучести, при наличии надрезов, по сравнению с их отсутствием, может быть описано в терминах нормальных напряжений ( $\Delta\sigma_n$ ). Указанная зависимость для случая мелких надрезов имеет следующий вид [2]:

$$\Delta\sigma_n = \tau_m \cdot \left( \frac{\beta_n}{K_t} - \beta_0 \right),$$

где  $\tau_m$  – предел текучести (в терминах касательных напряжений) объекта без надреза;  $\beta_n$  – степень жесткости напряженного состояния металла в области надрезов;  $K_t$  – теоретический коэффициент концентрации напряжений в области надрезов, определяемый только геометрией надреза;  $\beta_0$  – степень жесткости напряженного состояния, определяемая только схемой нагружения объекта, без надрезов.

Из уравнения следует, что в случае  $\Delta\sigma_n > 0$  и  $\beta_n/K_t > \beta_0$  получаем эффект упрочнения, если же  $\Delta\sigma_n < 0$  и  $\beta_n/K_t < \beta_0$  – эффект разупрочнения. По действующим стандартам, для болтов с обычной геометрией резьбы, значение теоретического коэффициента концентрации напряжений ( $K_t$ ) может быть оценено по соотношению:

$$K_t = 1 + a \sqrt{\frac{l_n}{\rho_n}},$$

где  $l_n$  и  $\rho_n$  – глубина и радиус «дна» надреза соответственно. Для случая исследованных болтов отношение указанных характеристик является постоянной величиной, равной  $\sim 4,5$ , при  $a=1$ . С другой стороны, следует учитывать значение эффективного коэффициента концентрации напряжений ( $K_t^{\text{эфф}}$ ), который в действительности должен определять фактическую концентрацию напряжений в болте при его нагружении. Значение  $K_t^{\text{эфф}}$  связано с величиной пластической релаксации упругих напряжений, которая приводит к увеличению значений  $\rho_n$  и, как следствие этого, к снижению концентрации напряжений [11, 14]. Кроме этого, следует учитывать зависимость релаксации напряжений от структурного состояния металла болта. В случае возрастания уровня упрочнения спо-

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

способность металла к релаксации напряжений снижается, а значение  $K_t^{\text{эфф}}$  увеличивается. Следовательно, при соблюдении условия  $\beta_n/K_t^{\text{эфф}} > \beta_0$  наблюдается первый интервал (рис. 1), а когда постоянный рост  $K_t^{\text{эфф}}$  приводит к соблюдению условия  $\beta_n/K_t^{\text{эфф}} < \beta_0$ , начинается второй интервал соотношения значений  $\sigma_e$  и  $\sigma_{0,2}$  для болтов и обточенных образцов. Другими словами, рассматриваемое соотношение  $\sigma_e$  и  $\sigma_{0,2}$  для болтов и обточенных образцов в первом интервале определяется упрочняющим, а во втором – разупрочняющим эффектом резьбы.

Различия в значениях характеристик пластичности и сопротивления вязкому разрушению (рис. 2, 3) в общем подтверждают негативное влияние резьбы на указанные характеристики.

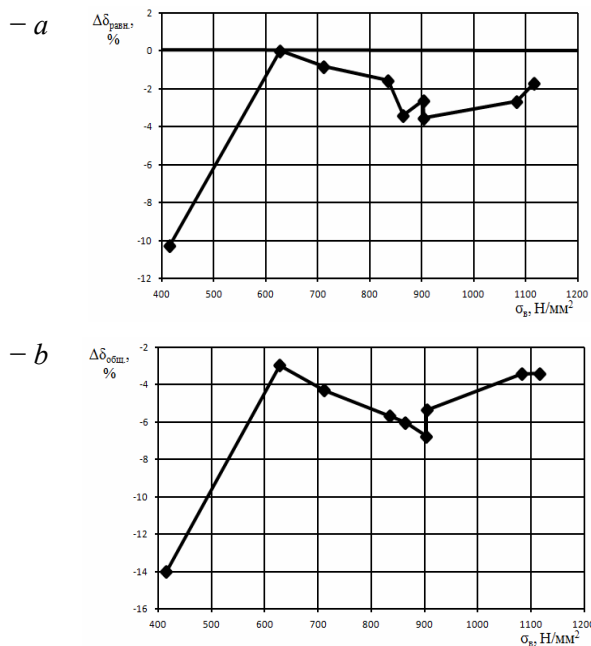


Рис. 2. Зависимость разницы между значениями равномерного (а) и общего (б) удлинения в зависимости от уровня упрочнения по пределу прочности

Fig. 2. The dependence of the difference between the values of the uniform (a) and the total (b) the elongation depending on the hardening by tensile strength

В то же время для структурного состояния металла после рекристаллизационного отжига наблюдаются значительные различия в общем и равномерном удлинении для болтов и обточенных образцов. С ростом уровня упрочнения наблюдаемые различия сначала существенно уменьшаются, а затем возрастают, хотя и не достаточно интенсивно. Гораздо более заметные различия в полученных данных испытаний для болтов и обточенных образцов наблюдаются при оценке по скорости падения номинального напряжения на стадии локализованной деформации и разрушения. Пропорционально уровню прочностных свойств металла возрастают и указанные различия (рис. 3).

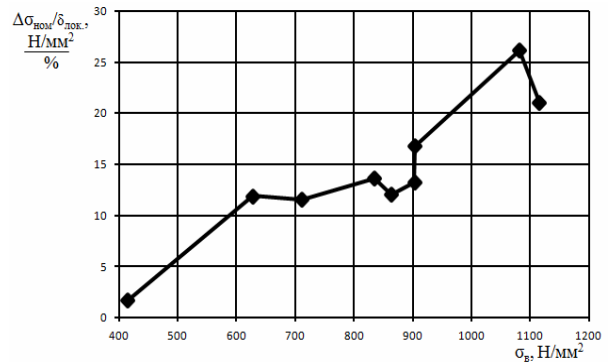


Рис. 3. Зависимость разницы между значениями условной скорости падения номинального напряжения для готовых болтов и обточенных образцов от уровня упрочнения

Fig. 3. The dependence of the difference between the values of the conditional rate of fall of the rated voltage for finished bolts and welded sample from the level of hardening

С учетом неизбежных перегрузок при эксплуатации изделий с высокопрочными болтовыми соединениями необходимо, кроме обточенных образцов, осуществлять испытания болтов в состоянии после завершения их изготовления.

### Научная новизна и практическая значимость

Впервые экспериментально показано, что система функциональных надрезов на конкретных металлоизделиях может оказывать как упрочняющее, так и разупрочняющее влияние на характеристики сопротивления пластической

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

деформации. Для различных уровней прочности металла дано объяснение наблюдаемого феномена с использованием соотношения показателя концентрации напряжений и степени жесткости напряженного состояния в области надрезов. Ограничение механических испытаний только готовыми болтами, кроме получения большего соответствия определяемых свойств болтов их конструктивной прочности при эксплуатации, способствует уменьшению общей длительности и трудоемкости испытаний в целом.

**Выводы**

1. Уровень различий механических свойств, определяемых на готовых болтах и обточенных образцах количественно и качественно зависит от уровня упрочнения, а также от типа определяемых механических характеристик. При этом наиболее существенны различия по пределам текучести и прочности и сопротивлению вязкому разрушению.

2. Показано, что наличие функциональных надрезов (резьбы) на готовых болтах оказывает различное влияние на пределы текучести и прочности в зависимости от уровня упрочнения: увеличивает значение этих характеристик в интервале до 800 МПа и уменьшает их в интервале более 800 МПа. Предложено объяснение наблюдаемым эффектам на основе изменения соотношения показателей концентрации напряжений и степени жесткости напряженного состояния.

3. Из результатов следует, что комплекс механических свойств болтов достаточно определять при натурных испытаниях без изготовления и испытаний обточенных образцов. Это позволит получать характеристики в большей степени соответствующие конструктивной прочности болтов при эксплуатации при одновременном снижении общей длительности и трудоемкости испытаний.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Войнов, К. Н. Решение трибологических проблем транспорта / К. Н. Войнов // Трансп. Российской Федерации. – 2009. – № 2. – С. 60–63.
2. Гуль, Ю. П. Основные принципы и практика геометрически-структурного упрочнения металлостроительных изделий / Ю. П. Гуль // Сталь. – 2012. – № 8. – С. 40–45.
3. Гуль, Ю. П. Оценка конструктивной прочности высокопрочных болтов на основе результатов статочных испытаний / Ю. П. Гуль, А. В. Ивченко, М. Ю. Амбражей // Сталь. – 2011. – № 9. – С. 42–46.
4. Ивченко, А. В. Совершенствование стандартов и методов испытания арматурного проката на растяжение / А. В. Ивченко, Ю. П. Гуль // Металлург. и горноруд. пр-ть. – 2014. – № 6. – С. 125–128.
5. Ключник, С. В. Эпоха новых технологий на службе у мостовых конструкций / С. В. Ключник // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 33. – С. 111–113.
6. Матлин, М. М. Исследование влияния концентраторов напряжения на прочность болтовых соединений / М. М. Матлин, Д. С. Манукян // SWorld : сб. науч. тр. – Одесса, 2012. – С. 423–427.
7. Моисеенко, К. В. Влияние длины прямой вставки на допустимые скорости движения поездов смежными стрелочными переводами, уложенными по первой схеме / К. В. Моисеенко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 38. – С. 117–126.
8. Петерсон, Р. Коэффициенты концентрации напряжений / Р. Петерсон. – Москва : Мир, 1977. – 300 с.
9. Петриков, В. Г. Прогрессивные крепежные изделия / В. Г. Петриков, А. П. Власов // – Москва : Машиностроение, 1991. – 256 с.
10. Роговский, А. Г. Механические свойства болтов из легированной стали / А. Г. Роговский, Ф. А. Шепелева // Метизное пр-во. – 1974. – Вип. 4. – С. 100–113.
11. Тарханов, В. И. Статистическая и усталостная прочность резьбовых соединений / В. И. Тарханов, З. М. Садриев // Сб. науч. тр. V Междунар. науч.-техн. конф. (15.10-16.10.2009). – Ульяновск : УлГТУ, 2009. – С. 132–134.
12. Вакуленко, И. А. Морфология структуры и деформационное упрочнение стали / И. А. Вакуленко, В. И. Большаков. – Днепропетровск : Маковецкий, 2008. – 196 с.
13. Bickford, J. H. Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints / J. H. Bickford. – London : Taylor & Francis Group, 2013. – 564 p.
14. Pedersen, N. L. Optimization of Bolt Stress / N. L. Pedersen // 10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization (19.05–24.05.2013). – 2013. – P. 142–148.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

15. Walter, D. Peterson's stress concentration factors / D. Walter. – New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2008. – 555 p.

Ю. П. ГУЛЬ<sup>1</sup>, А. В. ІВЧЕНКО<sup>2\*</sup>, П. В. КОНДРАТЕНКО<sup>3\*</sup>, Г. І. ПЕРЧУН<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Термічна обробка металів», Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпропетровськ, Україна, 49600, тел. +38 (0562) 46 24 53, ел. пошта kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua, ORCID 0000-0003-3754-7731

<sup>2\*</sup>Каф. «Термічна обробка металів», Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпропетровськ, Україна, 49600, тел. +38 (0562) 46 24 53, ел. пошта armst\_2000@mail.ru, ORCID 0000-0002-4518-1744

<sup>3\*</sup>Каф. «Термічна обробка металів», Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпропетровськ, Україна, 49600, тел. +38 (0562) 46 24 53, ел. пошта Achriman@yandex.ua, ORCID 0000-0003-2242-3496

<sup>4\*</sup>Каф. «Термічна обробка металів», Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпропетровськ, Україна, 49600, тел. +38 (0562) 46 24 53, ел. пошта kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua, ORCID 0000-0001-9013-4659

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ КОМПЛЕКСУ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ, ОТРИМАНИХ ПРИ ВИПРОБУВАННЯХ ГОТОВИХ БОЛТІВ ТА ОБТОЧЕНИХ ЗРАЗКІВ

**Мета.** Робота спрямована на опис системного експериментального дослідження впливу рівня зміцнення на співвідношення комплексів механічних властивостей готових болтів і обточених зразків. Аналіз отриманих даних на основі принципів геометрично-структурного зміцнення. **Методика.** Випробування на одноосний розтяг проводилися як на повнорозмірних болтах, так і на обточених зразках до діаметрів 10 і 8 мм на випробувальній машині FP – 100/1 із записом повної діаграми деформації та руйнування. **Результати.** Встановлено, що рівень міцності якісно і кількісно надає різний вплив на співвідношення характеристик опору пластичній деформації, характеристик пластичності та опору в'язкому руйнуванню, які визначаються на готових болтах й обточених зразках. При цьому проведений аналіз дозволяє вважати, що комплекс механічних властивостей, що визначається на готових болтах, найбільш адекватний їх механічній поведінці при експлуатації. Такий висновок особливо важливий для здавальних випробувань болтів класу міцності 8.8 і вище. **Наукова новизна.** Вперше експериментально показано, що система функціональних надрізів на конкретних металовиробах може надавати як зміцнюючий, так і знеміцнюючий вплив на характеристики опору пластичній деформації в термінах нормальних напружень в залежності від рівня зміцнення. Дано тлумачення спостережуваного феномена на основі зміни співвідношення показника концентрації напружень і ступеня жорсткості напруженого стану в області надрізів. **Практична значимість.** Обмеження механічних випробувань тільки готовими болтами, крім отримання більшої відповідності визначальних властивостей болтів їх конструктивній міцності при експлуатації, зменшують загальну тривалість і трудомісткість випробувань.

**Ключові слова:** високоміцні болти; готові болти; обточені зразки; випробування на розтяг; механічні властивості; надріз

Y. P. GUL<sup>1</sup>, A. V. IVCHENKO<sup>2\*</sup>, P. V. KONDRATENKO<sup>3\*</sup>, G. I. PERCHUN<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Dep. «Metal Heat Treatment», National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin Av., 4, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49600, tel. +38 (0562) 46 24 53, e-mail kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua, ORCID 0000-0003-3754-7731

<sup>2\*</sup>Dep. «Metal Heat Treatment», National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin Av., 4, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49600, tel. +38 (0562) 46 24 53, e-mail armst\_2000@mail.ru, ORCID 0000-0002-4518-1744

<sup>3\*</sup>Dep. «Metal Heat Treatment», National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin Av., 4, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49600, tel. +38 (0562) 46 24 53, e-mail Achriman@yandex.ua, ORCID 0000-0003-2242-3496

<sup>4\*</sup>Dep. «Metal Heat Treatment», National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin Av., 4, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49600, tel. +38 (0562) 46 24 53, e-mail kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua, ORCID 0000-0001-9013-4659



## COMPARATIVE ANALYSIS OF COMPLEX MECHANICAL PROPERTIES OBTAINED IN TESTS ON FINISHED BOLTS AND TURNED SAMPLES

**Purpose.** The purpose of the work is provided by the system experimental study of the effect of strengthening the level of the ratio of complex mechanical properties of the finished bolts and peeled samples and analysis of the data on the basis of geometric and structural reinforcement. **Methodology.** A uniaxial tensile test was carried out on full-size bolts and the peeled samples to diameters of 10 mm and 8 mm at a testing machine FP – 100/1 recording full diagram of deformation and fracture. **Findings.** The level of strength of qualitatively and quantitatively has different effects on the characteristics of the ratio of resistance to plastic deformation and ductility characteristics ductile fracture resistance, determined on the finished bolts and peeled samples. At the same time, the analysis suggests that the combination of mechanical properties determined on finished bolts, the most adequate to their mechanical behavior during operation. This conclusion is particularly important for acceptance testing of bolts of strength class 8.8 or higher. **Originality.** For the first time experimentally shown that the system is functional cuts on specific metal products can have both hardening and softening effect on the characteristics of resistance to plastic deformation in terms of normal stress depending on the level of hardening and given an interpretation of the observed phenomena on the basis of changes in the ratio of the concentration of eg-tions and the degree of rigidity of the stress state in the cuts. **Practical value.** Limitation of mechanical tests are only willing bolts, other than greater consistency determines the properties of their structural strength bolts in the operation, reduce the overall time-consuming tests.

*Keywords:* high-strength bolts; ready to bolt; planed samples; tensile test; mechanical properties; incision

### REFERENCES

1. Voynov K.N. Resheniye tribologicheskikh problem transporta [The solution of tribological problems of transport]. *Transport Rossiyskoy Federatsii – Transport of Russian Federation*, 2009, no. 2, pp. 60-63.
2. Gul Yu.P. Osnovnyye printsipy i praktika geometricheski-strukturnogo uprochneniya metalloizdeliy [Basic principles and practice of geometric and structural hardening of metal]. *Stal – Steel*, 2012, no. 8, pp. 40-45.
3. Gul Yu.P., Ivchenko A.V., Ambrazhey M.Yu. Otsenka konstruktivnoy prochnosti vysokoprochnykh boltov na osnove rezultatov sdatochnykh ispytaniy [Evaluation of the structural strength of high-strength bolts based on the results of delivery trials]. *Stal – Steel*, 2011, no. 9, pp. 42-46.
4. Ivchenko A.V., Gul Yu.P. Sovershenstvovaniye standartov i metodov ispytaniya armaturnogo prokata na rastyazheniye [The improvement of standards and test methods for reinforcing bars in tension]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost – Metallurgical and Mining Industry*, 2014, no. 6, pp. 125-128.
5. Klyuchnik S.V. Epokha novykh tekhnologiy na sluzhbe u mostovykh konstruktsiy [Era of new technologies for bridges constructions]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 33, pp. 111-113.
6. Matlin M.M., Manukyan D.S. Issledovaniye vliyaniya kontsentratorov napryazheniya na prochnost boltovykh soedineniy [Study of the stress concentrations effect on the strength of bolted connections]. *Sbornik nauchnykh trudov SWorld* [Proc. of SWorld]. Odessa, SWorld Publ., 2012, pp. 423-427.
7. Moysenyenko K.V. Vliyaniye dliny pryamoy vstavki na dopustimyye skorosti dvizheniya poyezdov smezhnymi strelochnymi perevodami, ulozhennymi po pervoy skheme [Fathom influence of straight insertion on allowed speed by allied pointworks which are created by the first scheme]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 38, pp. 117-126.
8. Peterson R. *Koeffitsienty kontsentratsii napryazheniy* [The coefficients of stress concentration]. Moscow, Mir Publ., 1977. 300 p.
9. Petrikov V.G., Vlasov A.P. *Progressivnyye krepzhenyye izdeliya* [Progressive fasteners]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 1991. 256 p.
10. Rogovskiy A.G., Shepeleva F.A. Mekhanicheskiye svoystva boltov iz legirovannoy stali [Mechanical properties of alloy steel bolts]. *Metiznoye proizvodstvo – Hardware Production*, 1974, issue 4, pp. 100-113.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

11. Tarkhanov V.I., Sadriev Z.M. Statisticheskaya i ustalostnaya prochnost rezbovykh soyedineniy [Statistical and fatigue strength of threaded connections]. *Sbornik nauchnykh trudov V Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (15.10.–16.10. 2009)* [Proc. of V Intern. Scientific and Technical Conf.]. Ulyanovsk, 2009, pp. 132-134.
12. Vakulenko I.A., Bolshakov V.I. *Morfologiya struktury i deformatsionnoye uprochneniye stali* [The morphology of the structure and work hardening of steel]. Dnepropetrovsk, Makovetskiy Publ., 2008. 196 p.
13. Bickford J.H. *Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints*. London, Taylor & Francis Group Publ., 2013. 564 p.
14. Pedersen N.L. Optimization of Bolt Stress. 10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization (19.05.–24.05.2013), 2013, pp. 142-148.
15. Walter D. Peterson's stress concentration factors. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc. Publ., 2008. 555 p.

*Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. С. И. Губенко (Украина); д.т.н., проф. Г. Д. Сухомлином (Украина); д.т.н., проф. И. А. Вакуленко (Украина)*

Поступила в редколлегию: 30.04.2015

Принята к печати: 14.08.2015