

**Б.С. Доненбаев^{1*}, С.Ш. Магавин², К.Т. Шеров², А.К. Ракишев¹,
М.М. Мусаев¹**

¹Карагандинский технический университет им. А. Сагинова, Караганда, Казахстан

²Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина,
Астана, Казахстан

E-mail: *bahytshan09@mail.ru

Экспериментальное исследование и численное моделирование стадии развития разрушений низкоуглеродистой стали

Аннотация. В данной работе представлены экспериментальное и численное исследование низкоуглеродистой стали при одноосном растяжении до разрушения. Испытание на растяжение с полным разрушением проводилось на разрывной машине МИ40. Данная машина позволяет испытывать образцы на растяжение и отображает кривую зависимости усилия от удлинения. Цилиндрические образцы низкоуглеродистой стали подготовлены согласно ISO 6892-1:2019 и соответствуют типу II. Для оценки испытания полученные усредненные кривые зависимости сила и удлинения были преобразованы в инженерные кривые зависимости напряжения от деформации. Инженерные (технические) кривые зависимости напряжения от деформации приведены к истинной. В истинной диаграмме третий этап - развитие шейки принят линейной. Численные исследования проведены по истинным диаграммам растяжения. В численном исследовании смоделированы все три этапа растяжения. Первый этап – линейный и задан модулем Юнга и коэффициентом Пуассона. Из полной истинной деформации извлечена пластичная и она применена во втором этапе деформации. Третий этап смоделирован такими параметрами, как: зависимость степени разрушения от смещения, деформация разрушения, трехосность напряжений и скорость деформации. Получены сравнительные графики зависимости напряжения от деформации экспериментального и численного исследования.

Ключевые слова: напряжение, деформация, разрушение, одноосное растяжение, низкоуглеродистая сталь, пластичность, моделирование.

DOI: doi.org/10.32523/2616-7263-2023-144-3-134-142

1. Введение

Конструкционная низкоуглеродистая сталь 3 относится к широко применяемым материалам. В производстве используется большинство видов стального проката и применяются в качестве элементов конструкции и деталей в различных отраслях. Низкоуглеродистые стали относят к труднообрабатываемым материалам из-за высокой вязкости, которая приводит к быстрому преждевременному износу и засаливанию зубьев инструмента при их обработке. В этой связи исследование процесса разрушения низкоуглеродистых сталей является актуальной задачей. Цель эксперимента в растяжении образца с последующим разрушением заключается в исследовании стадии развития разрушений и дальнейшее её численное моделирование.

Одноосное растяжение низкоуглеродистой стали состоит из трех этапов. На первом этапе зависимость между напряжением и деформацией линейная и тангенс угла между

ними характеризуется модулем упругости; на втором этапе в материале развивается пластическая деформация с наряду упругой, затем напряжение принимает максимальное значение – предел прочности и переходит в третье состояние, где начинается процесс разрушения [1, 2, 3].

Работа выполнена в рамках грантового финансирования молодых ученых по проекту АР19175058 «Численное моделирование процессов резания труднообрабатываемых материалов в условиях машиностроительных предприятий РК».

2. Экспериментальное исследование

Эксперимент проведен с учетом основных нормативных положений международного стандарта ИСО 6892-1:2019 Металлические материалы – Испытания на растяжение. Часть 1: Методика испытаний при комнатной температуре (ISO 6892-1:2019 Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature).

Основным видом испытаний материалов является статическое испытание на одноосное растяжение. Для проведения эксперимента были изготовлены пять специальных образцов цилиндрической формы из низкоуглеродистой стали согласно ISO 6892-1:2019 [4].

По таблице Б.2. принят образец под номером «7» с диаметром $d_0=5\text{мм}$; при этом расчетная длина составляет $l_0=5\text{мм}$ [4]. Остальные размеры образца приведены на рисунке 1.

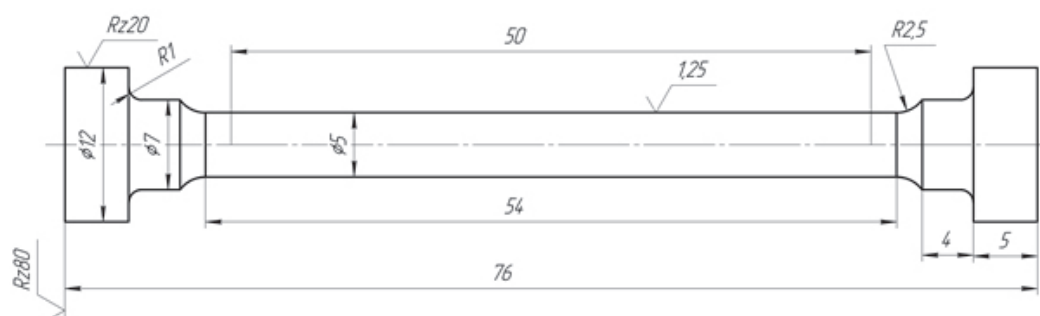


Рисунок 1. Образец типа III

Испытание проводилось на разрывной машине МИ40 с предельной нагрузкой 40 кН. Эта машина при помощи двух захватов растягивает образец и обеспечивает построение графика зависимости усилия от деформации и данная зависимость отображается на экране компьютера. В результате мы испытали пять образцов на одноосное растяжение до разрыва (рисунок 2).



Рисунок 2. Испытанные образцы на растяжение

На рисунке 2 во всех испытанных образцах разрушение произошло образованием шейки выше срединного сечения, то есть ближе к местам захвата.

Ниже представлена усредненная диаграмма зависимости между удлинением и силой сопротивления образца (рисунок 3).

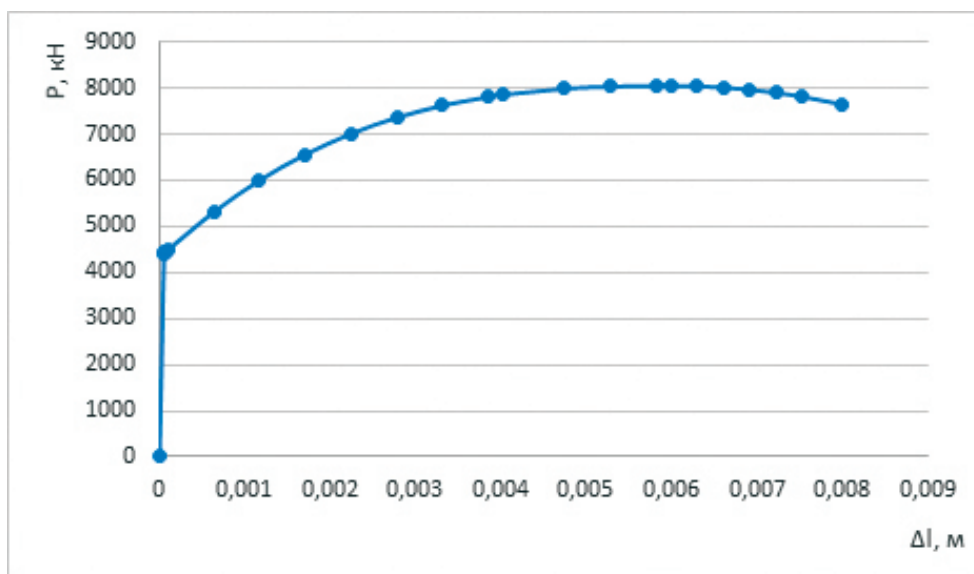


Рисунок 3. Усредненная диаграмма зависимости между удлинением и силой сопротивления образца

Далее преобразуем диаграмму зависимости усилия от удлинения образца в кривую зависимости «напряжение-деформация» (рисунок 4) по известным выражениям [5, 6]:

$$\sigma_{eng} = \frac{F}{A_0} \varepsilon_{eng} = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (1)$$

где A_0 - площадь поперечного сечения образца; $l_0 = 50\text{мм}$ - расчетная длина образца.

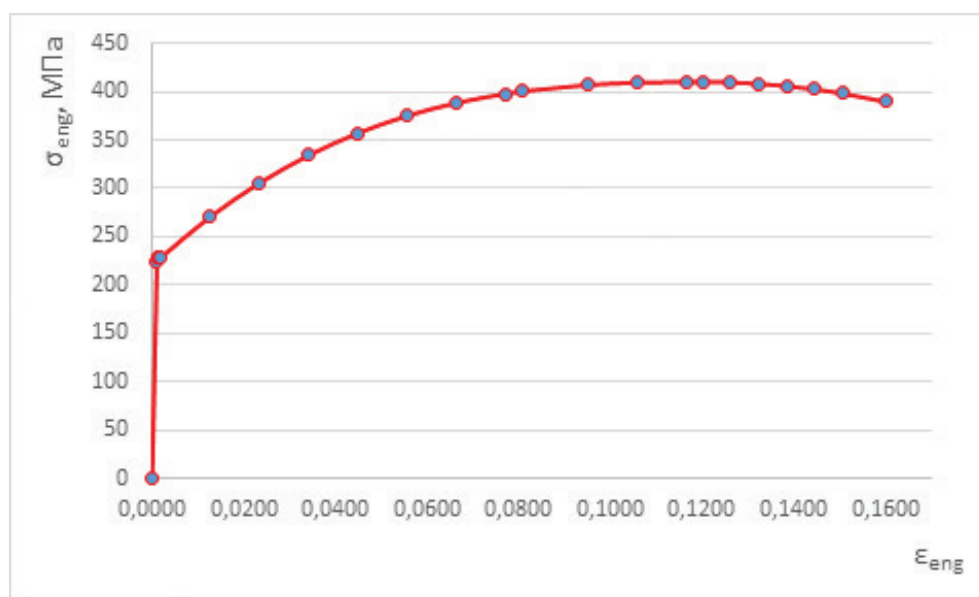


Рисунок 4. Диаграмма зависимости нормального напряжения от деформации

В данной диаграмме напряжение и деформация носят название «инженерное», которое необходимо преобразовать в «истинную». Название «инженерное» (техническое) дано из-за того, что в данной диаграмме не учтены удлинение образца с каждым нагружением и сужение поперечного сечения после достижения предела прочности. Для учета выше указанных недочетов зарубежные авторы предлагают применить следующие выражения [5, 6]:

$$\begin{aligned} \sigma_{true} &= \sigma_{eng} (1 + \varepsilon_{eng}), \varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon_{eng}), \\ \sigma_{f,true} &= \frac{F_f}{A_f}, \varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon_{eng}), \end{aligned} \quad (2)$$

где A_f - площадь поперечного сечения шейки; F_f – усилие при разрушении.

Для визуального сравнения инженерных и истинных кривых зависимости нормальных напряжений от деформации поместим их на одном графике (рисунок 5).

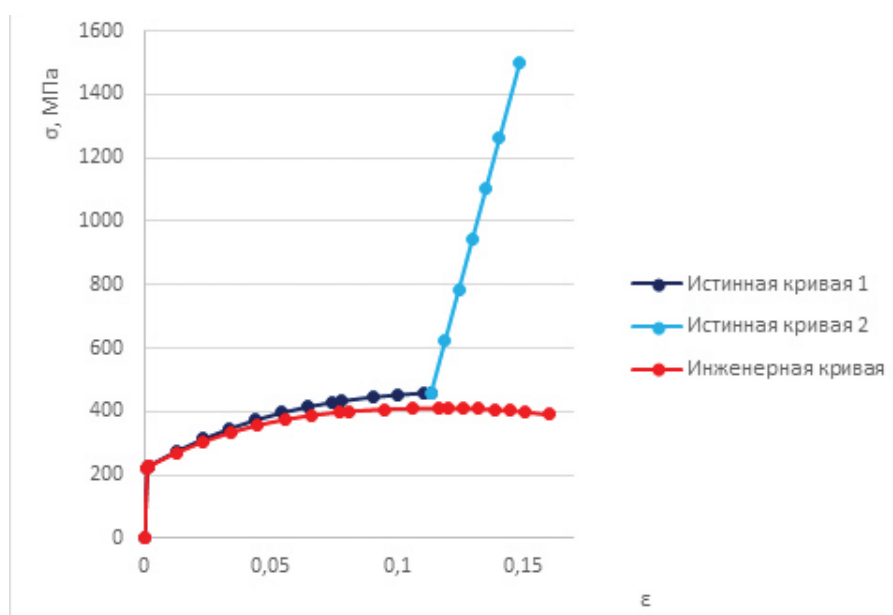


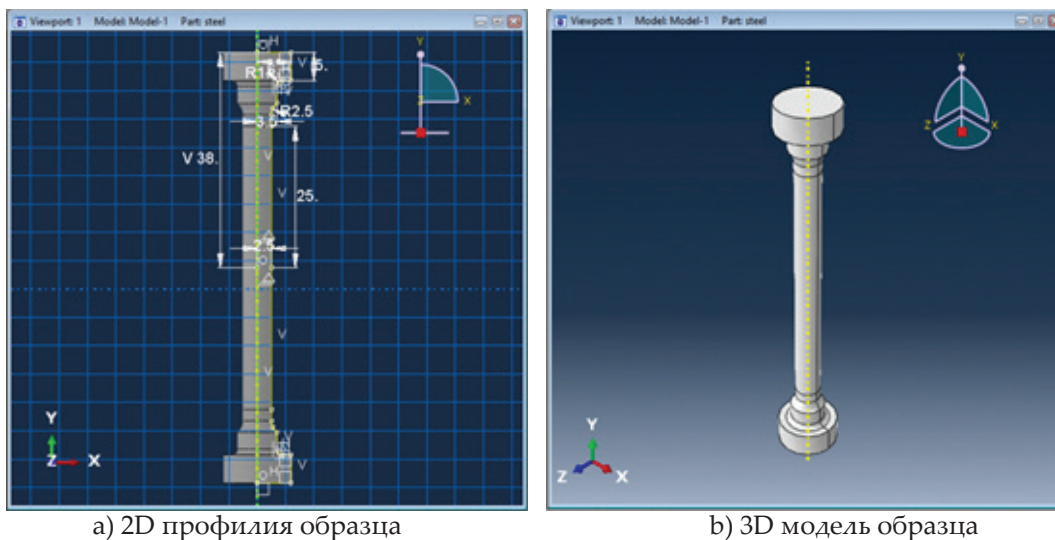
Рисунок 5. Сравнение инженерной и истинной кривых

Из рисунка 5 заметим, что истинная деформация меньше инженерной, а истинное напряжение выше инженерной. Наиболее заметна разница напряжения после предельного напряжения (предел прочности), и она объясняется развитием шейки на месте разрыва. Истинное напряжение разрушения составляет 1502 МПа, а инженерная – 390 МПа, что выше в 3,85 раза.

3. Численное исследование

Здесь смоделировано поведение образца при численном расчете на растяжение в программе Abaqus. Имитируем все этапы одноосного растяжения в трех стадиях. Используем истинную кривую зависимости «напряжение-деформация», полученное экспериментальным путем. Выделим основные пункты моделирования: построение или импорт геометрии объекта (образца); задание свойств материала; разбишка на конечные элементы; граничные условия; запуск на расчет и просмотр результатов.

Построение модели образца производим в самой среде программы. И она выполняется построением 2D профиля образца и затем получение 3D вращением относительно оси вращения на 360 градусов (рисунок 6).



а) 2D профиля образца

б) 3D модель образца

Рисунок 6. Построение модели образца;

Разбивка на конечные элементы (рисунок 7) образца была произведена с учетом удаления элементов.

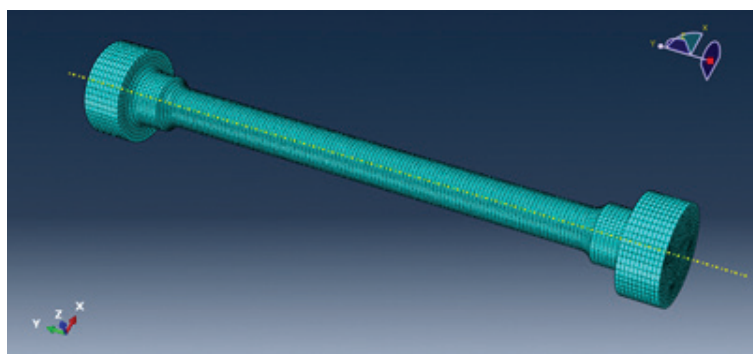


Рисунок 7. Конечная элементная модель образца

Граничные условия. Для имитации одноосного растяжения и принципа работы подвижного и неподвижного захватов нижняя часть образца жестко заделана, а верхняя часть ограничена степени подвижности, кроме осевого направления, где было задано перемещение (рисунок 8).

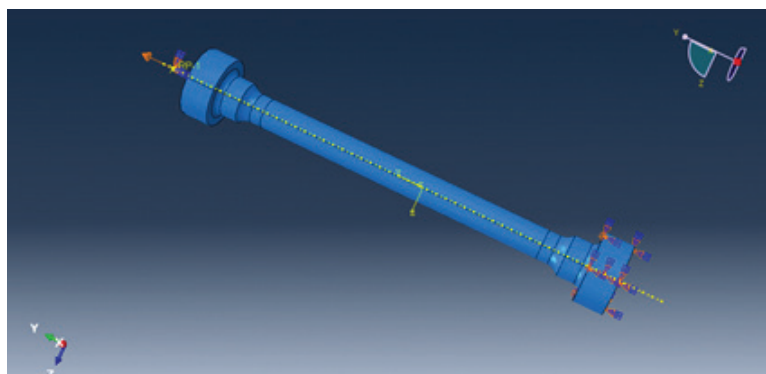


Рисунок 8. Граничные условия

Самым сложным является выбор и задание свойств материала. Первый этап – линейный. Линейное свойство задается модулем упругости и коэффициентом Пуассона. На втором этапе развивается пластическая деформация и для ее решения воспользуемся формулой чтобы заполнить таблицу Plasic [5, 6]:

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_{trus} - \varepsilon_y = \varepsilon_{trus} - \frac{\sigma_y}{E}. \quad (3)$$

По истинной кривой «напряжение-деформация» рассчитан ряд параметров развития разрушения. Ниже продемонстрирована диаграмма эволюции разрушения, которая является одним из ключевым факторов образования шейки с разрушением.

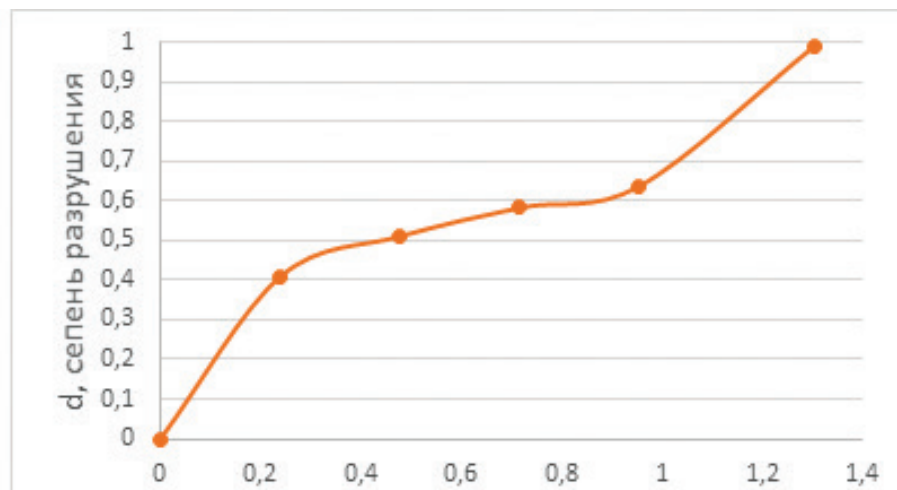
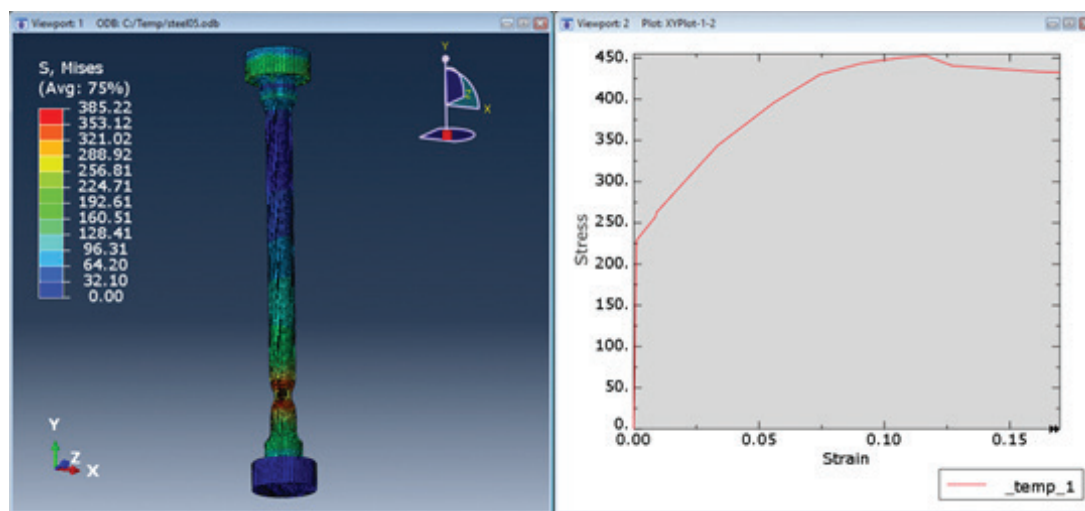


Рисунок 9. Кривая зависимости степени разрушения (d) от смещения (u_{pl})

Анализ результатов

Результаты численного моделирования - картина образования шейки на образце и кривая зависимости напряжения от деформации показаны на рисунках 10а и 10б.



а) образование шейки

б) кривая зависимости напряжения от деформации

Рисунок 10. Результаты численного исследования низкоуглеродистой стали при одноосном растяжении

Образование шейки (рисунок 10а) в численном моделировании и в экспериментальном исследовании (рисунок 2) практически идентичны по расположению.

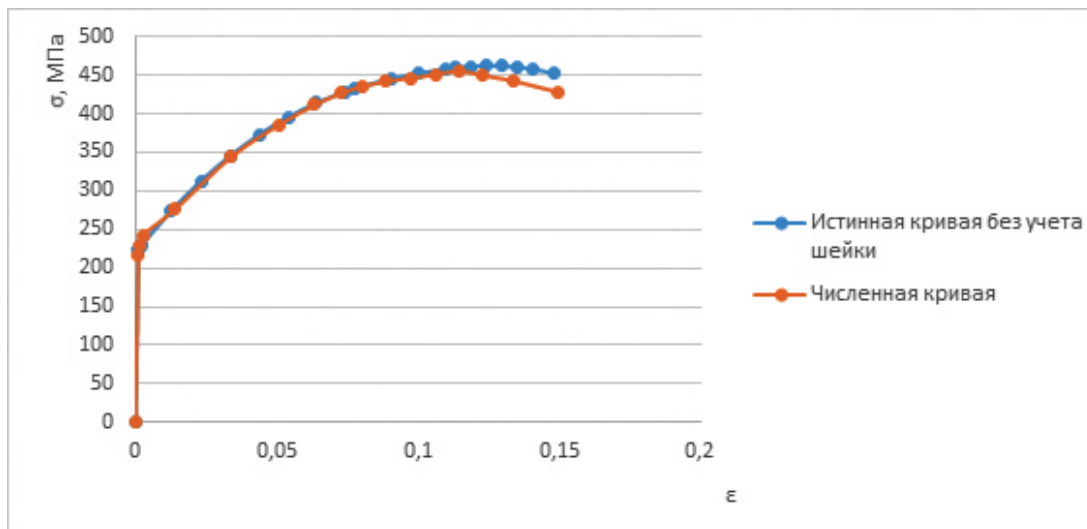


Рисунок 11. Сопоставление кривых зависимости напряжения от деформации экспериментального с численным

Если сравнить кривые зависимостей (напряжения от деформации) экспериментального (без учета шейки) с численным, то можно видеть слияние до предела прочности, а далее в зоне разрушения видим некоторые отклонения.

Полученные численные и экспериментальные данные будут использованы в численном моделировании процессов резания.

4. Выводы

- Были испытаны на одноосное растяжения с последующим разрывом образцы из низкоуглеродистой стали согласно ISO 6892-1:2019;
- получены инженерные (технические) кривые зависимости напряжения и деформации и приведены к истинной;
- по истинным диаграммам одноосного растяжения были проведены численные исследования;
- истинное напряжение разрушения составляет 1502 МПа, а инженерная – 390 МПа, что выше в 3,85 раза;
- образование шейки (рисунок 10а) в численном моделировании и в экспериментальном исследовании (рисунок 2) практически идентичны по расположению;
- сравнение кривых зависимостей напряжения от деформации экспериментального (без учета шейки) с численным показало слияние до предела прочности, а далее в зоне разрушения замечены отклонения.

Список литературы

1. Norbert Vita, Akanshu Sharma Behaviour of single bonded anchors in uncracked steel fibre reinforced concrete under tensile loading – Experimental investigations and analytical model//Engineering Structures, Volume 288, 1 August 2023, 116088.
2. Chaoqun Zeng, JiHua Zhu, Cheng Xiong, Yanru Li, Dawang Li, Joost Walraven Analytical model for the prediction of the tensile behaviour of corroded steel bars//Construction and Building Materials, Volume 258, 20 October 2020, 120290.

3. Xing-Ju Yang a, Feng Lin Experimental and analytical studies on tensile behavior of kinked steel plates//Journal of Constructional Steel Research, Volume 204, May 2023, 107874.
4. ISO 6892–1:2019 Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature. Available at: <https://www.iso.org/ru/standard/78322.html> (дата обращения: 07.06.2023)
5. Courtney, Thomas (2005). Mechanical behavior of materials. Waveland Press, Inc. pp. 6–13.
6. Beer, F.; Johnston, R.; Dewolf, J.; Mazurek, D. (2009). Mechanics of materials. New York: McGraw-Hill companies.

Төмен көміртекті болаттың қирауының даму кезеңін тәжірибелік зерттеу және сандық үлгілеу

Б.С. Доненбаев¹, С.Ш. Магавин², К.Т. Шеров², А.К. Ракишев¹, М.М. Мусаев¹

¹Ә. Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды, Қазақстан

²С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Қазақстан

Аңдатпа. Бұл жұмыста төмен көміртекті болатты қирауға дейін бір осьтік созудың тәжірибелік және сандық зерттеулері ұсынылады. Толық қираумен созуға сынау МИ40 ұзу машинасында жүргізілді. Бұл машина үлгілерді созып сынауға мүмкіндік береді және күштің ұзаруға тәуелді қисығын көрсетеді. Төмен көміртекті болаттан жасалған цилиндрлік үлгілер ISO 6892–1:2019 стандартына сәйкес дайындалған және II типке сәйкес келеді. Сынақтарды бағалау үшін күштің ұзаруға тәуелді орташаланып алынған қисықтары кернеудің деформацияға қатысты инженерлік қисықтарына түрлендірілді. Кернеудің деформацияға қатысты инженерлік қисықтары шынайыға (ақиқат) келтірілді. Шынайы диаграммадағы үшінші кезеңі, демек мойыншаның даму бөлігі сызықтық деп қабылданды. Сандық зерттеулер созылудың шынайы диаграммасы бойынша жүргізілді. Сандық зерттеулерде созылудың барлық үш кезеңі де үлгіленді. Бірінші кезең сызықты және Юнг модулі мен Пуассон коэффициенті арқылы берілді. Толық шынайы деформациядан илемді деформация ажыратылды және деформацияның екінші сатысында қолданылды. Үшінші кезең келесі параметрлер бойынша модельденді: бұзылу дәрежесінің орын ауыстыруға тәуелділігі, қирау деформациясы, кернеудің үш өстілігі және деформация жылдамдығы. Тәжірибелік және сандық зерттеулер нәтижесінде кернеудің деформацияға тәуелділігінің салыстырмалы графиктері алынды.

Түйін сөздер: кернеу, деформация, қирау, бірөстік созу, төмен көміртекті болат, илемділік, үлгілеу.

Experimental study and numerical modeling of the stage of development of fractures in low-carbon steel

B. Donenbayev¹, S. Magavin², K. Sherov², A. Rakishev¹, M. Mussayev¹

¹A. Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan

²S.Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, Kazakhstan

Abstract. This paper presents an experimental and numerical study of low-carbon steel under uniaxial tension to failure. The tensile test with destruction was carried out on an MI40 tensile testing machine. This machine allows you to test samples in tension and displays a curve of force versus elongation. Low-carbon steel cylindrical specimens are prepared according to ISO 6892–1:2019 and conform to Type II. To evaluate the test, the resulting averaged force-elongation curves were converted into engineering stress-strain curves. Engineering (technical) stress-strain curves are brought to truth. In the true diagram, the third stage - the development of the cervix - is assumed to be linear. Numerical studies were carried out using true tension diagrams. In the numerical study, all three stages of extension were simulated. The first stage is linear and is specified by Young's modulus and Poisson's ratio. From the total true deformation, the plastic one is extracted and applied in the second stage of deformation. The third stage is modeled by such parameters as a dependence of the degree of destruction on displacement, fracture strain, stress triaxiality and strain rate. Comparative graphs of the dependence of stress on deformation from experimental and numerical studies were obtained.

Keywords: stress, deformation, fracture, uniaxial tension, low-carbon steel, plasticity, modeling.

References

1. Norbert Vita, Akanshu Sharma Behaviour of single bonded anchors in uncracked steel fibre reinforced concrete under tensile loading – Experimental investigations and analytical model//Engineering Structures, Volume 288, 1 August 2023, 116088.
2. Chaoqun Zeng, JiHua Zhu, Cheng Xiong, Yanru Li, Dawang Li, Joost Walraven Analytical model for the prediction of the tensile behaviour of corroded steel bars//Construction and Building Materials, Volume 258, 20 October 2020, 120290.
3. Xing-Ju Yang a, Feng Lin Experimental and analytical studies on tensile behavior of kinked steel plates//Journal of Constructional Steel Research, Volume 204, May 2023, 107874.
4. ISO 6892–1:2019 Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature. Available at: <https://www.iso.org/ru/standard/78322.html> (Accessed: 07.06.2023)
5. Courtney, Thomas (2005). Mechanical behavior of materials. Waveland Press, Inc. pp. 6–13.
6. Beer, F.; Johnston, R.; Dewolf, J.; Mazurek, D. (2009). Mechanics of materials. New York: McGraw-Hill companies.

Сведения об авторах:

Б.С. Доненбаев – PhD, старший научный сотрудник, Карагандинский технический университет им. А. Сагинова, пр. Н. Назарбаева, 56, Караганда, Казахстан.

С.Ш. Магавин – к.т.н., доцент, Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина, пр. Женис, 62, Астана, Казахстан.

К.Т. Шеров – д.т.н., профессор, Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина, пр. Женис, 62, Астана, Казахстан.

А.К. Ракишев – PhD, старший преподаватель, Карагандинский технический университет им. А. Сагинова, пр. Н. Назарбаева, 56, Караганда, Казахстан.

М.М. Мусаев – PhD, ассоциированный профессор, Карагандинский технический университет им. А. Сагинова, пр. Н. Назарбаева, 56, Караганда, Казахстан.

Б.С. Доненбаев – PhD, аға ғылыми қызметкер, Ә. Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, пр. Н. Назарбаева даң., 56, Қарағанды, Қазақстан.

С.Ш. Магавин – т.ғ.к., доцент, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Жеңіс даң., 62, Астана, Қазақстан.

К.Т. Шеров – т.ғ.д., профессор, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Жеңіс даң., 62, Астана, Қазақстан.

А.К. Ракишев – PhD, аға оқытушы, Ә. Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, пр. Н. Назарбаева даң., 56, Қарағанды, Қазақстан.

М.М. Мусаев – PhD, қауымдастырылған профессор, Ә. Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, пр. Н. Назарбаева даң., 56, Қарағанды, Қазақстан.

B. Donenbaev – PhD, Researcher, A. Saginov Karaganda Technical University, 56 N. Nazarbayev Ave., Karaganda, Kazakhstan.

S. Magavin – Ph.D., Associate Professor, S.Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, Kazakhstan, 62 Zhenis Ave., Astana, Kazakhstan.

K. Sherov – Doctor of Technical Sciences, Professor, S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, Kazakhstan, 62 Zhenis Ave., Astana, Kazakhstan.

A. Rakishev – PhD, Senior Lecturer, A. Saginov Karaganda Technical University, 56 N. Nazarbayev Ave., Karaganda, Kazakhstan.

M. Mussayev – PhD, Associate Professor, A. Saginov Karaganda Technical University, N. Nazarbayev Ave., 56, Karaganda, Kazakhstan.