

УДК 620.17:669.14

Влияние размера и формы плоских образцов на определяемые кратковременные механические свойства материалов

С.М. Ирмагамбетова, М.С. Тарасова, Б.А. Тарасов, И.И. Коновалов
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

Целью данной работы является изучение влияния размера и формы плоских образцов на определяемые кратковременные механические свойства материала.

Исследование проводилось на образцах из сталей марок AISI 316 и 430. Были изготовлены образцы 5 видов, в том числе и образцы, изготовленные согласно ГОСТ 1497-2023 с рабочей длиной от 6 до 20 мм и шириной от 1,5 до 10 мм. В качестве захватов были использованы клиновые захваты, а также захваты с опорой на плечики. Испытания на одноосное растяжение были проведены при разных скоростях нагружения.

Из полученных данных были определены средние значения пределов прочности и текучести для каждого вида образца. При сравнении полученных значений механических свойств для пяти видов образцов отклонение пределов прочности от значения образцов, изготовленных согласно ГОСТ 1497-2023, составило не более 5 %, пределов текучести – 8%. Отклонение значений равномерного удлинения образцов от значений стандартных образцов составило не более 26% для стали марки 316 и не более 23% для стали марки 430, остаточного удлинения – не более 28% и 12% соответственно.

Было показано, что результаты при растяжении малочувствительны к скорости растяжения в данном диапазоне скоростей (не более 8%).

Ключевые слова: Микрообразцы, кратковременные механические свойства, скорость деформации, плоский образец.

Influence of size and shape of flat samples on the determined short-term mechanical properties of materials

S.M. Irmagambetova, M.S. Tarasova, B.A. Tarasov, I.I. Konovalov
National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow

The aim of this work is to study the influence of the size and shape of flat samples on the determined short-term mechanical properties of the material. The study was conducted on samples of AISI 316 and 430 steel grades. Five types of samples were manufactured (including samples manufactured according to GOST 1497-2023, with a working length of 6 to 20 mm and a width of 1.5 to 10 mm. Wedge grips were used for large samples, as well as grips with shoulder support for smaller samples. Uniaxial tensile tests were carried out at different loading rates.

From the obtained data, the average values of tensile strength and yield strength were determined for each type of sample. When comparing the obtained values of mechanical properties for five types of samples, the deviation of tensile strength from the value of samples manufactured according to GOST 1497-2023 was no more than 5%, yield strength - 8%. The deviation of the values of uniform elongation of samples from the values of standard samples was no more than 26% for steel grade 316 and no more than 23% for 430 grade steel, residual elongation was no more than 28% and 12%, respectively. It was shown that the results in tension are not very sensitive to the rate of extension in this range of speeds (no more than 8%).

Key words: Microdes, short -term mechanical properties, deformation speed, flat sample.

ВВЕДЕНИЕ

Исследователей давно интересует возможность оценки механических свойств материала, используя образцы небольшого размера [1-3], однако на данный момент нет стандарта на микромеханические испытания на одноосное растяжение [3, 4].

Использование миниатюрных образцов для испытания на растяжение имеет свои особенности и преимущества. Во-первых, благодаря их компактным размерам возможно проведение большего количества тестов с использованием меньшего количества материала, что является важным аспектом при работе с дорогостоящими или ограниченными в объеме материалами. Во-вторых, миниатюрные образцы можно испытывать быстрее, что позволяет повысить производительность работ, особенно при разработке нового материала. В радиационном материаловедении использование микрообразцов может как экономить место в облучательных устройствах, так и способствовать уменьшению дозовых нагрузок при последующих испытаниях облученных образцов [5, 6].

Однако стоит отметить, что при использовании маленьких образцов необходимо учитывать возможное искажение результатов испытаний из-за более высокой чувствительности к внешним воздействиям и меньшей неоднородности в объеме материала [7].

Механические свойства, определяемые при испытании на одноосное растяжение, такие как предел прочности, предел текучести и равномерная и остаточная деформации материалов, являются основными механическими свойствами, которые имеют жизненно важное значение для механического анализа, оптимального

проектирования и оценки безопасности инженерных конструкций.

Свойства при растяжении не зависят от толщины образца, если отношение толщины образца превышает средний размер зерна более чем в 5-20 раз в зависимости от материала. При толщине меньше критической материал уже не может отражать объёмные механические свойства. Для сталей этот показатель равен 6-10 [8-9]. В данной работе исследовались образцы с отношением толщины к размеру зерна порядка 50.

В работе [10] изучалось влияние геометрии образца на растяжение на деформацию плоских образцов сплава Циркалой-4 при соотношении длины к ширине (коэффициент тонкости) от 1:1 до 4:1. Было показано, что геометрия образца оказывает незначительное влияние на значения предела текучести, прочности на разрыв, равномерной деформации при максимальной нагрузке и показателя деформационного упрочнения.

На данный момент испытания микрообразцов на одноосное растяжение еще не стандартизированы, однако они могут давать данные о механических свойствах, которые будут репрезентативны и для стандартных образцов. Поэтому цель данной работы - изучить влияние размера и формы плоских образцов на определяемые кратковременные механические свойства материала.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводилось на образцах из листов толщиной 0,5 мм промышленных плавок сталей аустенитного и ферритного классов - AISI 316 и AISI 430, химические составы сталей приведены в таблице

Таблица 1

Химические составы сталей

Марка	Fe	C	Cr	Ni	Mn	Mo	Si	P	S	N
AISI 316	основа	0,08	16-18	10-14	2	2,0-3,0	0,75	0,045	0,03	0,10
AISI 430	основа	0,12	16-18	-	-	1	1	0,045	0,03	-

Методом электроэрозионной резки были изготовлены образцы 5 видов (в том числе и образцы, изготовленные согласно ГОСТ 1497-2023 [4]). Внешний вид образцов представлен на рис. 1.

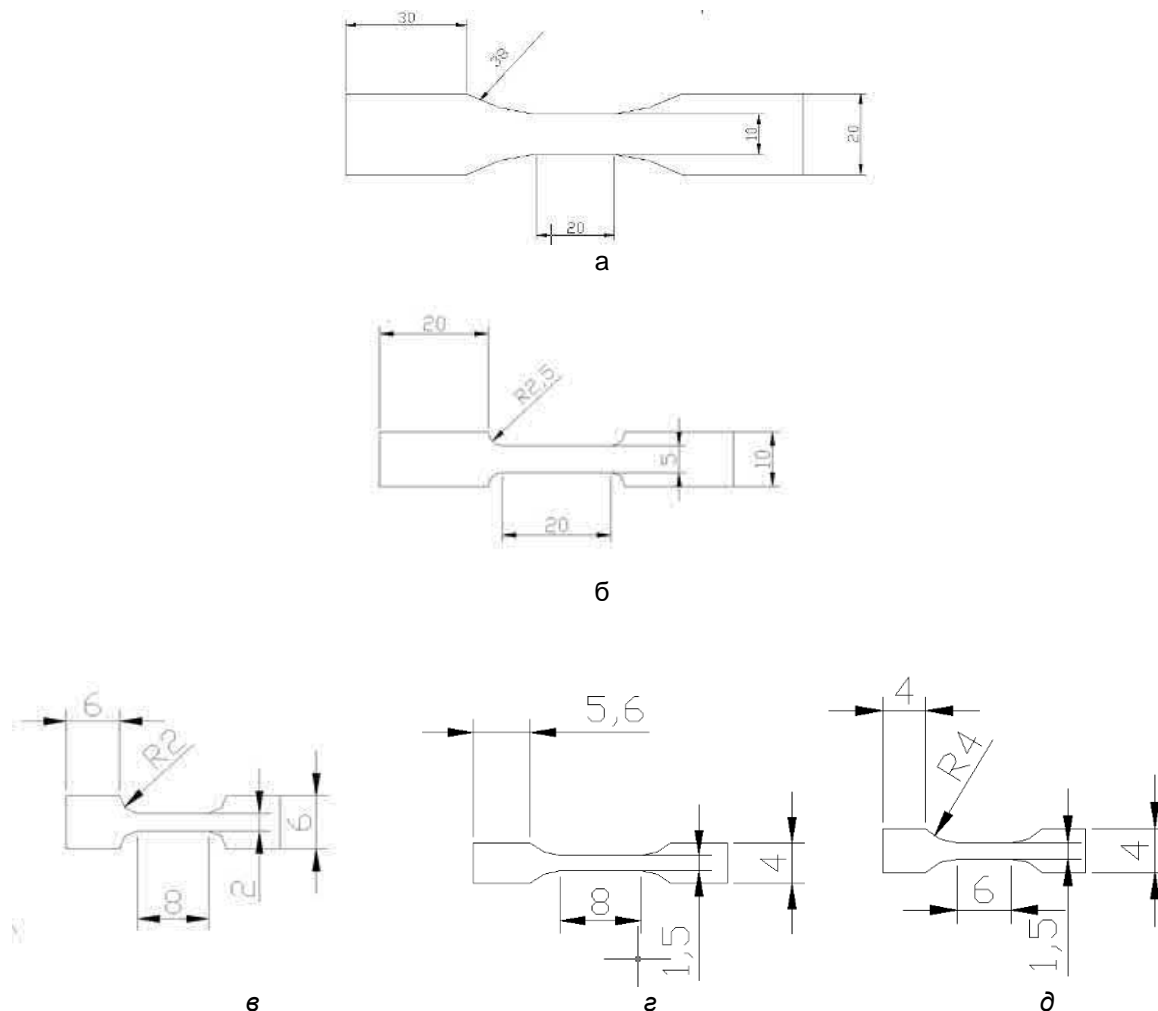


Рис. 1. Типы образцов а – тип 1 образец, изготовленный согласно ГОСТ 1497-2023, б – тип 2, в – тип 3, г – тип 4, д – тип 5

В таблице 2 представлены геометрические параметры образцов, за тип образца принималось отношение рабочей длины к ширине.

Таблица 2
Геометрические параметры исследуемых образцов

Тип образца	Рабочая длина, мм	Ширина, мм
1	20	10
2	20	5
3	8	2
4	8	1,5
5	6	1,5

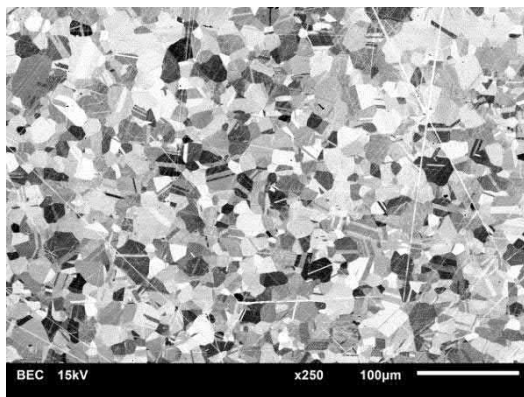
Все образцы были вырезаны в направлении прокатки. Испытания на одноосное растяжение проводились на универсальной испытательной машине УТС-111.2-50 (Тест-системы, г. Иваново) при разных скоростях: при одинаковых скоростях траверсы для всех образцов – 1 мм/мин, а также при одинаковых скоростях деформации – 0,00025 с⁻¹.

В качестве захватов были использованы клиновые захваты для образцов типа 1-2, а также захваты с опорой на плечики для образцов типа 3-4.

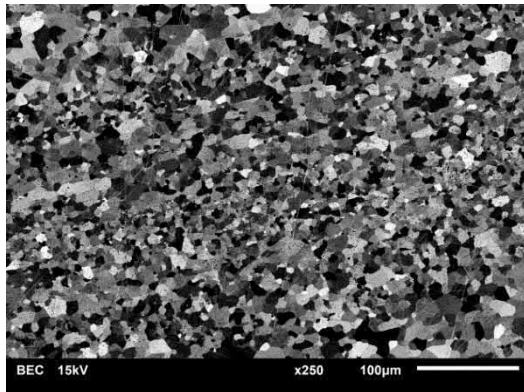
Перед проведением экспериментов для всех образцов были определены ширина и толщина испытуемого образца как среднее значение по результатам трех измерений вдоль каждого образца.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Как было показано в работах [8-9], микрообразцы могут отображать объемные свойства материала при толщине выше критической, то есть при толщине, превышающей размер зерна в 6-10 раз (для стали). Как видно из рис. 2, средний размер зерна стали AISI 316 составляет порядка 13 мкм, а стали AISI 430 – 8 мкм, таким образом, толщины образцов превышают средний размер зерна в 38 и 63 раза соответственно.



а



б

Рис. 2. Микроструктура образцов сталей а) AISI 316, б) AISI 430

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Для обеспечения достоверности эксперимента было проведено по 3 испытания для каждого типа образцов при скоростях травессы 1 мм/мин; в таблице 3 представлены соответствующие скорости растяжения для каждого типа образцов. Такая скорость деформации была выбрана потому, что во многих публикациях проводят испытания именно при такой скорости перемещения травессы [5]; также, согласно ГОСТ [4], рекомендуемая скорость деформации при определении пределов прочности и пределов текучести должна быть в пределах от 0,00025 до 0,0025 с⁻¹. Таким образом, скорости деформации образцов находятся в рекомендуемом интервале значений, лишь для образцов типа 5 скорость незначительно превышает рекомендуемое значение.

Таблица 3
Скорость деформации образцов

Тип образца	Скорость деформации, с ⁻¹
1	0,00083
2	0,00083
3	0,00208
4	0,00208
5	0,00278

Также было проведено по 10 испытаний для каждого типа образцов при одинаковой скорости деформации 0,00025 с⁻¹.

Для образцов всех типов разрушение происходило примерно по середине рабочей части образца.

На рис. 3-4 представлены диаграммы растяжения двух видов стали, полученные в ходе испытаний.

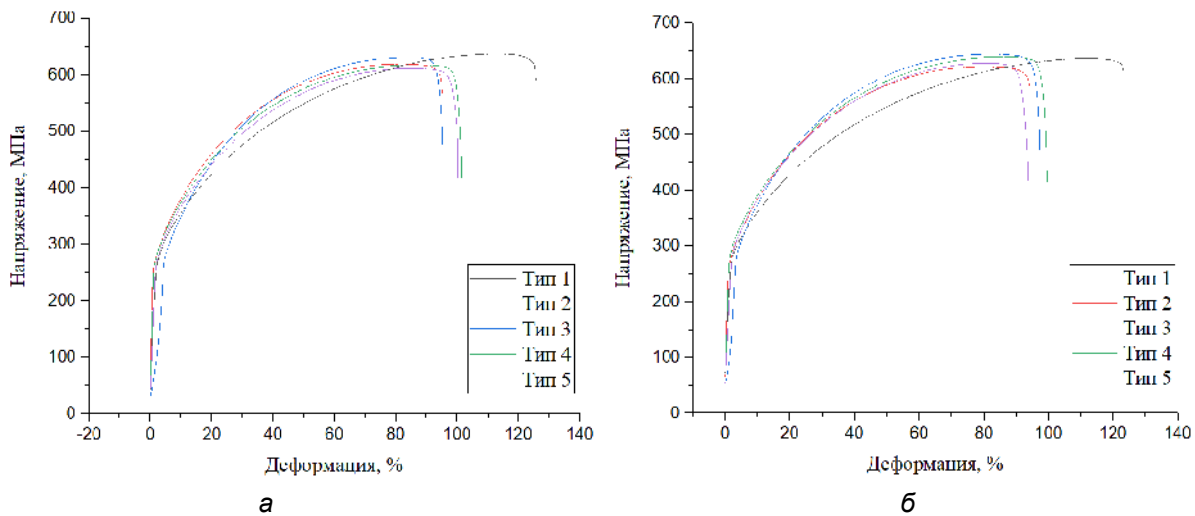


Рис. 3 Деформационные кривые для стали AISI 316
а) при скорости деформации $0,00025 \text{ с}^{-1}$, б) при скорости перемещения траверсы 1 мм/мин

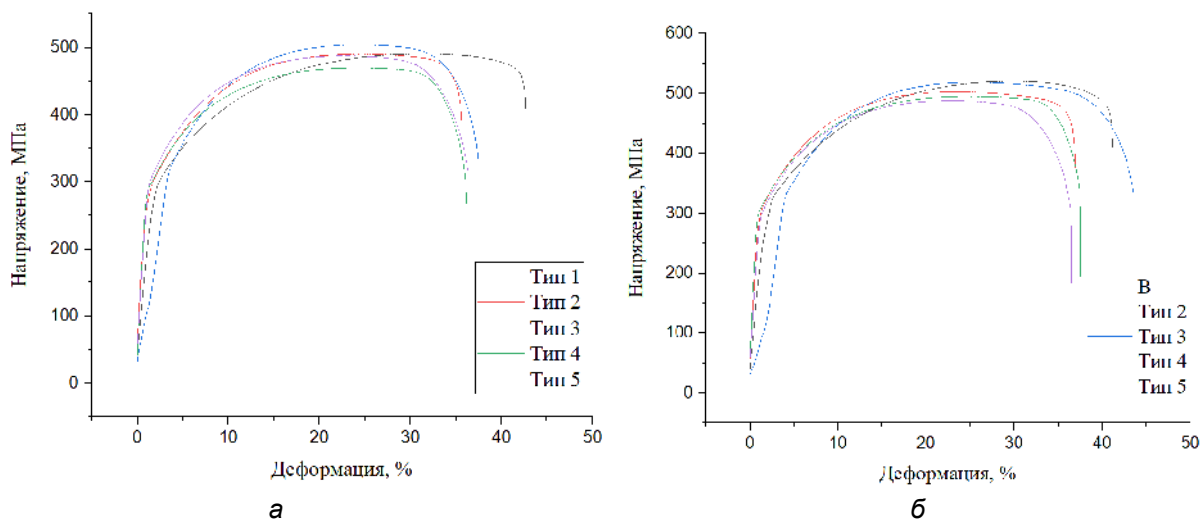


Рис. 4 Инженерные кривые деформации для стали AISI 430
а) при скорости деформации $0,00025 \text{ с}^{-1}$, б) при скорости перемещения траверсы 1 мм/мин

Как видно из рисунков, кривые деформации имеют схожий вид для разных типов образцов, однако образцы типа 3 имеют более пологий наклон кривой в области упругой деформации. Общее удлинение образцов типа 1 больше, чем

у других образцов. Были определены следующие данные: пределы прочности и текучести, равномерное и остаточное удлинение (рис. 5-6).

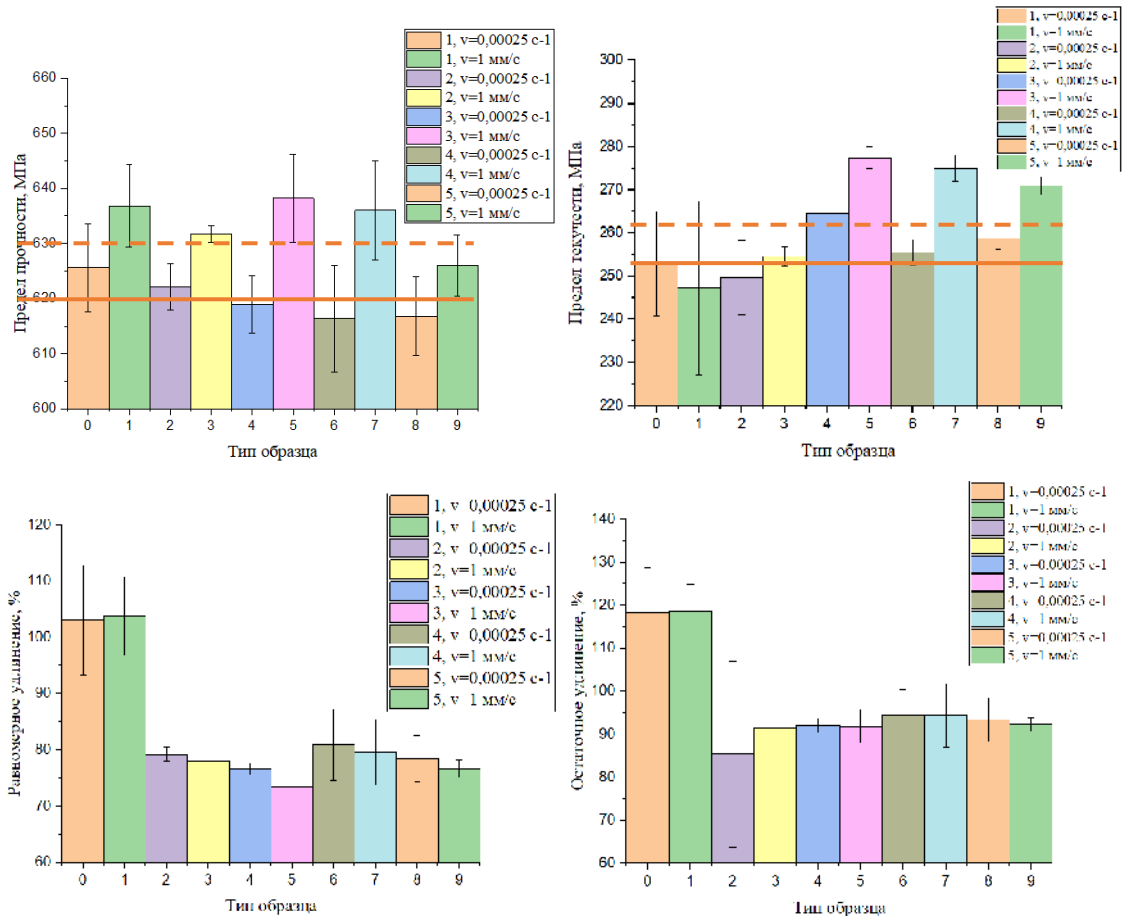


Рис. 5. Зависимость кратковременных механических свойств от геометрии образцов для стали AISI 316

Из полученных данных были рассчитаны средние значения пределов прочности и текучести для каждого вида образца; образцы типа 1 показали наибольшие значения пределов прочности относительно других типов образцов для обеих марок стали. При сравнении полученных значений механических свойств у пяти видов образцов, отклонение пределов прочности от значения образцов, изготовленных согласно ГОСТ 1497-2023 (тип 1), составило не более 1,5% для стали 316 и 5% для стали 430, пределов текучести – 5 и 7% соответственно для одинаковой скорости деформации 0,00025 с⁻¹. Также видно, что эти параметры не очень чувствительны к скорости растяжения, однако наблюдается следующая тенденция: чем выше скорость деформации, тем больше значения пределов прочности и текучести. Максимальные отклонения пределов прочности и текучести для стали 316 наблюдались у образцов типа 4 и составили 3 и 8% соответственно, для стали 430 – у образцов типа 2 и составили 4 и 6% соответственно.

Результаты показывают, что конструкция образцов типов 2-5 могут обеспечивать повторяемые результаты, а также показывают хорошую сходимость с образцами, изготовленными согласно ГОСТ, при определении пределов прочности и текучести.

Измерение пластичности материала обычно включает в себя два важных компонента: равномерное растяжение до того момента, когда происходит образование шейки, и остаточное растяжение после начала образования шейки.

Равномерное и остаточное удлинение образцов типа 1 (при соотношении длины образца к ширине 2 : 1) значительно выше удлинения других образцов (4 : 1), таким образом, можно говорить о том, что степень равномерного и остаточного удлинения зависит от влияния геометрии образца на развитие шейки. При деформации при максимальной нагрузке на всех типах образцов наблюдается сужение горловины, для образцов типа 1 (2 : 1) это сужение затрагивает относительно часть образца, большую, чем у образцов других конфигураций.

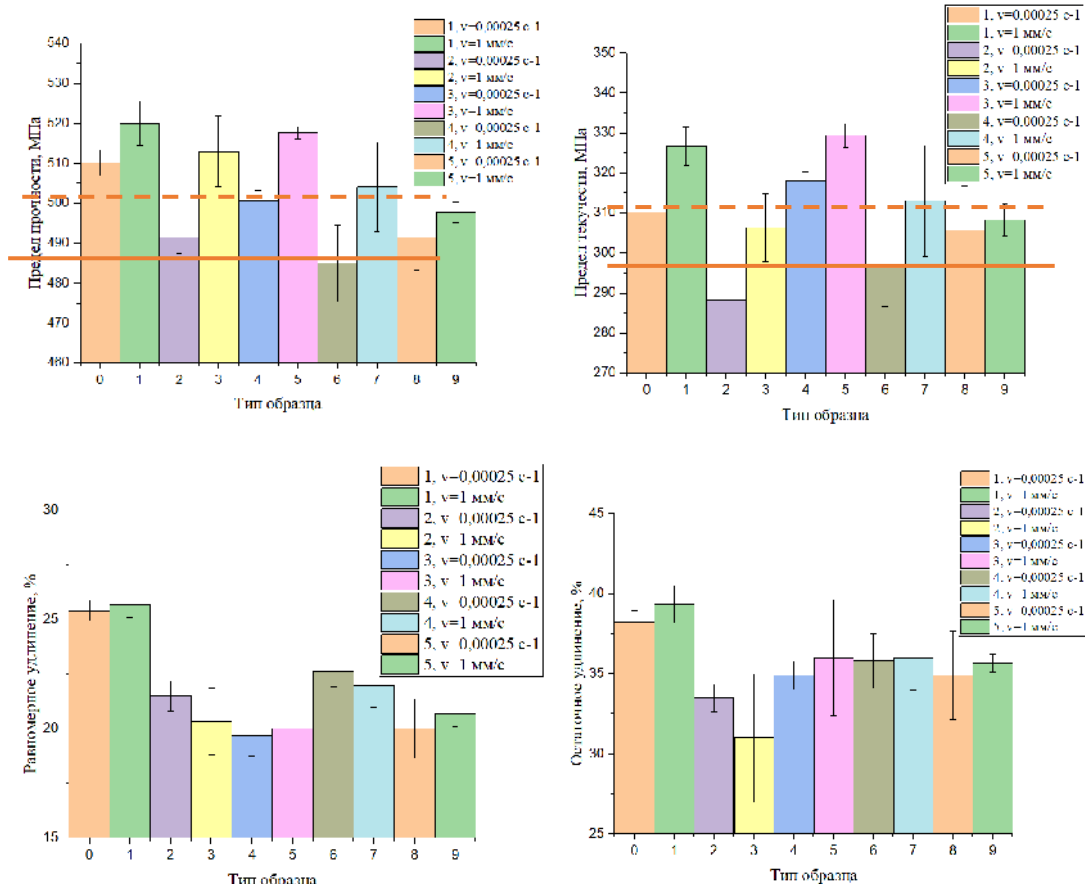


Рис. 6. Зависимость кратковременных механических свойств от геометрии образцов для стали AISI 430

Отклонение значений равномерного удлинения образцов типа 2-5 от значений, полученных для образцов типа 1, составило не более 26% для стали марки 316 и не более 23% для стали марки 430, остаточного удлинения – не более 28% и 12% соответственно.

Также видно, что удлинение практически не зависит от скорости деформации. Максимальные отклонения равномерного и остаточного удлинения для стали 316 наблюдались у образцов типа 2 и составили 2 и 7% соответственно, для стали 430 – у образцов типа 2 и составили 6 и 8%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании предложены новые конструкции образцов на растяжение, имеющие меньшие размеры по сравнению с образцами, соответствующими ГОСТу 1497-2023. В ходе экспериментов с использованием двух различных сплавов AISI 316 и AISI 430 показано, что предложенные конструкции можно использовать при опреде-

лении пределов прочности и текучести на растяжение. Предложенные конструкции показывают хорошую сходимость значений пределов прочности и текучести в сравнении с образцами, изготовленными согласно ГОСТу. Максимальные процентные различия пределов прочности и текучести между предложенными конструкциями и стандартной составляют не более 5 и 8% соответственно.

Геометрия образцов сильно влияет на равномерное и общее удлинение, более короткий стандартный образец имеет гораздо большие значения удлинения. Отклонение значений равномерного удлинения образцов от значений стандартных образцов составило не более 26% для стали марки 316 и не более 23% для стали марки 430, остаточного удлинения – не более 28% и 12% соответственно.

Полученные результаты испытаний на растяжение не особенно чувствительны к скорости деформации в текущем диапазоне скоростей деформации: отклонение составляет не более 4 и 8% для пределов прочности и текучести и 6 и 8% для равномерного и остаточного удлинения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kumara K. et al. Use of miniature tensile specimen for measurement of mechanical properties // *Procedia Engineering*, 2014. Vol. 86. P. 899 – 909.
2. Zhang L. et al. The development of miniature tensile specimens with non-standard aspect and slinness ratios for rapid alloy prototyping processes // *Journal of materials research and technology*, 2021. Vol. 15. P. 1830-1843.
3. Zheng P., Chen R., Liu H., Chen J., Zhang Z., Liu X., et al. On the standards and practices for miniaturized tensile test – a review // *Fusion Engineering and Design*, 2020. 161:112006.
4. ГОСТ 1497-2023. Межгосударственный стандарт. Металлы. Методы испытаний на растяжение"
5. Klueh R. L. Miniature tensile test specimens for fusion reactor irradiation studies // *Nuclear engineering and design. Fusion.* – 1985. – Т. 2. – №. 3. – С. 407-416.
6. Gussev M. N. et al. Sub-size tensile specimen design for in-reactor irradiation and post-irradiation testing // *Nuclear Engineering and Design.* – 2017. – Т. 320. – С. 298-308
7. Zhu T. T., Bushby A. J., Dunstan D. J. Materials mechanical size effects: a review // *Materials Technology.* – 2008. – Т. 23. – №. 4. – С. 193-20
8. Kohyama A., Hamada K., Matsui H. Specimen size effects on tensile properties of neutron-irradiated steels // *Journal of nuclear materials.* – 1991. – Т. 179. – С. 417-420.
9. Miyazaki S., Shibata K., Fujita H. Effect of specimen thickness on mechanical properties of polycrystalline aggregates with various grain sizes // *Acta Metallurgica.* – 1979. – Т. 27. – №. 5. – С. 855-862.
10. O.N. Pierron et al., Tensile specimen geometry and the constitutive behavior of Zircaloy-4 // *Journal of Nuclear Materials*, 2003. Vol. 312. P. 357-261

Поступила в редакцию / Received 24.12.2024

Поступила после рецензирования / Revised 20.01.2025

Принята к публикации / Accepted 03.02.2025