

**Механика материалов:
прочность, ресурс, безопасность****Materials mechanics:
strength, durability, safety**DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-8-55-61>**ВЛИЯНИЕ МАСШТАБНОГО ФАКТОРА НА МОДУЛЬ НОРМАЛЬНОЙ
УПРУГОСТИ СТАЛИ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЙ РАСТЯЖЕНИЕМ ОБРАЗЦОВ**

© Вячеслав Михайлович Матюнин*, Артем Юрьевич Марченков,
Мария Викторовна Горячкина, Антон Юрьевич Поройков, Дарья
Александровна Жгут, Мырзамамат Арзиевич Каримбеков, Анастасия
Алексеевна Панькина

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14;

*e-mail: MatyuninVM@mpei.ru

*Статья поступила 20 января 2023 г. Поступила после доработки 24 февраля 2023 г.
Принята к публикации 30 марта 2023 г.*

Модуль нормальной упругости считается достаточно устойчивой физико-механической характеристикой материалов, мало зависящей от их состава и структуры. Среди факторов, влияющих на модуль нормальной упругости, выделяют температуру и анизотропию. Сведения о влиянии масштабного фактора на модуль нормальной упругости весьма ограничены, а иногда и противоречивы. Цель данной работы — исследование влияния масштабного фактора на модуль упругости стали 45, определяемый растяжением геометрически подобных образцов с разным исходным диаметром. Испытания образцов проводили на универсальной машине Instron 8801 со скоростью деформирования 0,1 мм/мин при комнатной температуре. Упругие деформации при растяжении измеряли двумя способами — с помощью навесного экстензометра и методом корреляции цифровых изображений. Оба метода показали достаточно близкие результаты при испытании образцов одинакового диаметра. Однако метод корреляции цифровых изображений позволил выполнить измерения упругих деформаций на образцах малого диаметра, на которых нельзя было закрепить экстензометр. Установлено снижение модуля упругости с увеличением исходного диаметра образца. Получены графические зависимости модуля упругости от диаметра образца и площади его поперечного сечения. Изложены возможные причины снижения модуля упругости под влиянием масштабного фактора. Среди этих причин основными можно считать уменьшение удельной поверхности и удельной поверхностной энергии, увеличение деформируемого объема, снижение скорости деформации при постоянной скорости деформирования. Уменьшение модуля упругости под воздействием масштабного фактора необходимо учитывать в расчетах на прочность и при оценке остаточного ресурса деталей и конструкций с относительно большими сечениями и толщинами стенок.

Ключевые слова: модуль нормальной упругости; растяжение образцов; экстензометр; метод корреляции цифровых изображений; масштабный эффект.

**THE SCALE FACTOR EFFECT ON YOUNG'S MODULUS OF STEEL SPECIMENS
DETERMINED BY TENSILE TESTS**

© Vyacheslav M. Matyunin*, Artem Yu. Marchenkov, Maria V. Goryachkina,
Anton Yu. Poroykov, Daria A. Zhgut, Myrzamamat A. Karimbekov,
Anastasia A. Pankina

National research university "Moscow Power Engineering Institute", 14, Krasnokazarmennaya ul., Moscow, 111250, Russia;

*e-mail: MatyuninVM@mpei.ru

Received January 20, 2023. Revised February 24, 2023. Accepted March 30, 2023.

The modulus elasticity (or Young's modulus) is considered to be a rather stable physical and mechanical characteristic of metallic materials being a weak function of the chemical composition and structure. However, the temperature and anisotropy can be referred as the main factors affecting the Young modulus. Scanty data on the scale factor effect on Young's modulus are sometime even contradictory. We present the results of studying the impact of the scale factor on Young's modulus of steel 45 determined by the

tension of cylindrical tensile specimens with different initial diameters on an Instron 8801 machine with a movable traverse speed of 0.1 mm/min at room temperature. An extensometer and a digital image correlation (DIC) method were used to measure elastic deformations. Both methods showed fairly close results during tensile testing of specimens with equal diameters. DIC method made it possible to measure elastic deformations on small-size specimens on which it was impossible to fix the extensometer. A decrease in the Young modulus with an increase in the specimen diameter has been revealed. Graphical dependences of the Young modulus on the specimen diameter and cross-sectional area have been obtained. Possible reasons for the decrease in the Young modulus under the influence of the scale factor have been indicated. A decrease in the specific surface area and specific surface energy, an increase in the deformable volume, and a decrease in the strain rate at a constant movable traverse speed are among the main reasons. The decrease in Young's modulus under the influence of the scale factor must be taken into account in strength calculations and in assessing the residual life of large-scale parts and structures with relatively large cross sections and wall thicknesses.

Keywords: Young's modulus; tensile tests; extensometer; digital image correlation; scale factor.

Введение

Модуль нормальной упругости (модуль Юнга) E_m — фундаментальное физико-механическое свойство металла, характеризующее жесткость его кристаллической решетки, которая зависит от межатомного притяжения. Чем выше модуль нормальной упругости, тем меньшую упругую деформацию ε вызывает одно и то же действующее напряжение σ , что следует из закона Гука

$$\sigma = E_m \varepsilon. \quad (1)$$

Модуль нормальной упругости — параметр, широко применяемый в механике материалов и конструкций, физике, материаловедении, кристаллографии и других дисциплинах. Например, E_m используют для расчетов на прочность деталей и конструкций, оценки ресурса металла и изделий под воздействием эксплуатационных факторов, установления связей между различными механическими характеристиками и других целей.

Принято считать, что модуль нормальной упругости является устойчивой физико-механической характеристикой металлов и сплавов, мало зависящей, например, от химического состава, режимов термической обработки, скорости нагружения. Среди факторов, способных повлиять на модуль нормальной упругости, выделяют в основном температуру [1, 2], анизотропию [3, 4], структурную повреждаемость. Однако влияние масштабного фактора, обусловленное размерами образцов, изучено мало. В технической литературе встречаются подобные сведения, но они ограничены и неоднозначны. В качестве масштабных параметров иногда используют диаметр образца или его удельную поверхность. Так, например, в [5] выявлено значительное увеличение E_m при уменьшении диаметров образцов от 70 до 30 мм для композитных материалов. Заметим, что у подобных образцов с уменьшением диаметров увеличивается его удельная поверхность. Однако согласно результатам экспериментов,

приведенным в [6], с увеличением удельной поверхности образца явных изменений E_m не наблюдается. Авторы [7] при исследовании E_m резонансным методом выявили его сильное повышение при переходе от микро- к нанодиапазону.

В связи с вышеизложенным цель данной работы — исследование влияния размеров образцов на модуль нормальной упругости при его определении методом растяжения.

Материалы, образцы, оборудование и методики экспериментов

Для установления влияния масштабного фактора на значение модуля нормальной упругости проводили серию испытаний на растяжение образцов с различными размерами. Использовали цилиндрические пропорциональные пятикратные образцы, различающиеся диаметрами и длиной рабочей части.

Материал образцов — прутки диаметром 20 мм из среднеуглеродистой конструкционной стали 45. Из этого прутка точением были изготовлены подобные пятикратные цилиндрические образцы с диаметрами рабочих частей d_0 , равными 19,00; 13,01; 10,79; 4,99; 3,05; 1,85 и 0,99 мм. На последнем этапе изготовления образцов их поверхности обрабатывали электролитическим способом для снятия наклепа, полученного механической обработкой.

Испытания образцов растяжением выполняли на машине Instron 8801 со скоростью деформирования 0,1 мм/мин. При определении модуля нормальной упругости E_m в упругой части диаграммы использовали навесной экстензометр Instron GL10 с измерительной базой 10 мм (рис. 1).

Навесной экстензометр позволял точно фиксировать изменение продольной деформации рабочей части образца ($\varepsilon_{\text{экт}}$) и строить диаграмму растяжения в координатах напряжение σ — деформация $\varepsilon_{\text{экт}}$. Нагружение каждого образца проводили в упругой области до достижения напряжения не менее 200 МПа, после чего образец

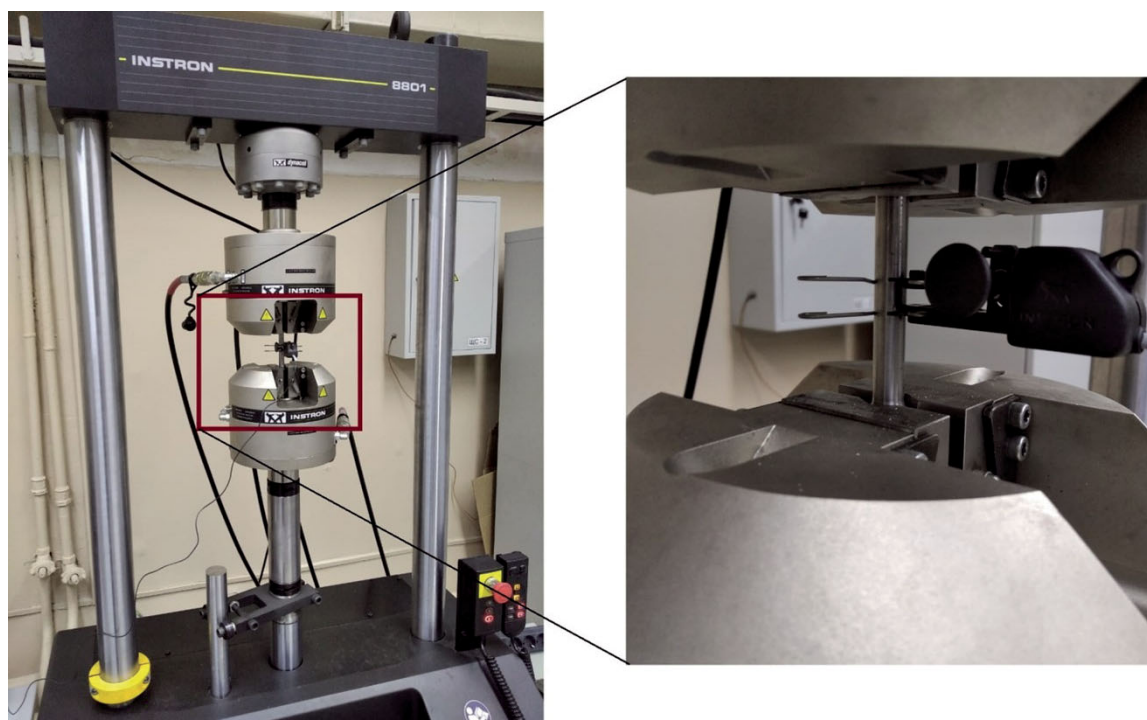


Рис. 1. Испытательная машина Instron 8801 с установленным навесным экстензометром для определения модуля нормальной упругости материала

Fig. 1. Instron 8801 testing machine with extensometer for Young's modulus determination

разгружали, чтобы убедиться, что его деформация носила полностью упругий характер. Такие нагружения повторяли не менее пяти раз для каждого образца. Затем в интервале напряжений от 0 до 200 МПа полученную диаграмму растяжения аппроксимировали прямой линией с использованием метода наименьших квадратов и по наклону полученного упругого участка относительно горизонтальной оси определяли модуль нормальной упругости по формуле

$$E_M = \sigma / \varepsilon_{\text{экт}}. \quad (2)$$

Навесной экстензометр не удавалось надежно закрепить на рабочих частях самых тонких образцов ($d_0 = 0,99$ мм). В связи с этим для определения модуля нормальной упругости на этих образцах, а также некоторых образцах большего диаметра использовали оптический метод измерения деформаций — метод корреляции цифровых изображений (Digital Image Correlation, или DIC). Он основан на получении изображений поверхности образца во время деформации. Кросс-корреляционная обработка изображений позволяет отследить изменения, происходящие с поверхностью во время испытаний, и рассчитать поле деформации с высоким пространственным разрешением. В качестве измерительной установки использовали систему LaVision StrainMaster (рис. 2).

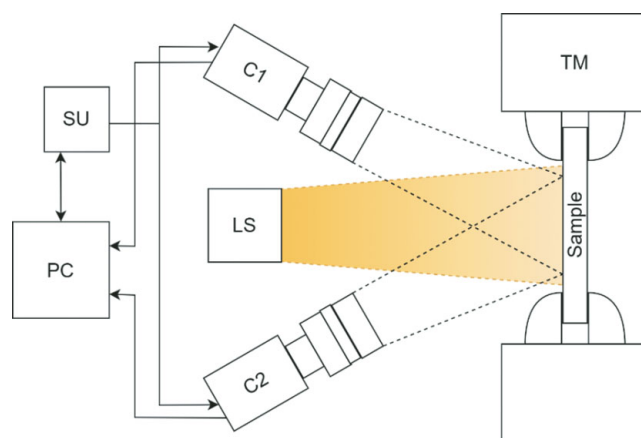


Рис. 2. Схема испытания статическим растяжением стального образца с применением оптической измерительной системы LaVision StrainMaster: PC — персональный компьютер; TM — испытательная машина; Sample — образец; LS — система освещения; C1 и C2 — две камеры; SU — блок синхронизации

Fig. 2. Static tensile test scheme for a steel sample using a LaVision StrainMaster optical measuring system: PC — personal computer; TM — testing machine; LS — lighting system; C1 and C2 — cameras; SU — synchronization unit

Система LaVision StrainMaster состоит из двух видеокамер Imager SX (C1 и C2), устройства синхронизации захвата изображений с камер PTU (SU) и персонального компьютера (PC) с программным обеспечением DaVis 8.4. Цифровые камеры Imager SX построены на основе мо-

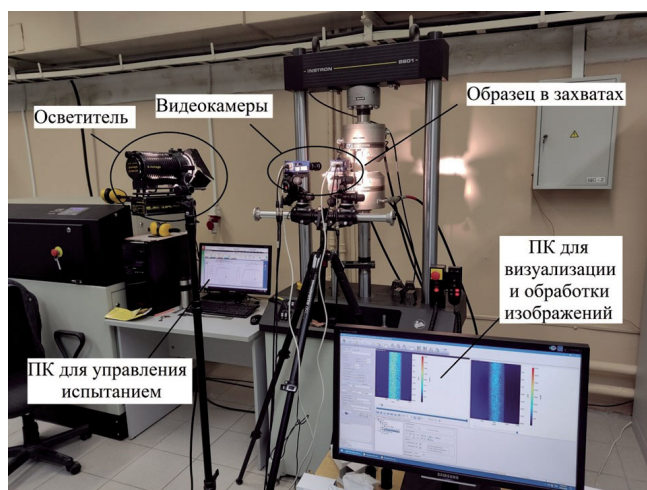


Рис. 3. Фото приборов и установок для определения модуля упругости с использованием оптической измерительной системы LaVision StrainMaster на испытательной машине Instron 8801

Fig. 3. Photo of the experimental set for Young's modulus determination using the Digital Image Correlation method on an Instron 8801 testing machine

нохромной ПЗС матрицы размером 2/3" с разрешением 2456×2058 пикселей, размером пикселей $3,45 \times 3,45$ мкм и разрядностью получаемых изображений 12 бит. Поле зрения при регистрации экспериментальных изображений для разных размеров образцов варьировалось в диапазоне от $3,5 \times 3,0$ до $17,5 \times 14,0$ мм². Для получения качественных контрастных изображений использовали дополнительный внешний источник освещения (LS).

Перед испытанием образца растяжением на боковую поверхность его рабочей части наносили случайный спекл-рисунок белой и черной красками для повышения контрастности изображения

при использовании метода корреляции цифровых изображений. Затем образец закрепляли в захватах машины, после чего устанавливали осветитель и аппаратуру для видеосъемки и измерения деформаций. На рис. 3 показано фото эксперимента с использованием оптического метода.

В процессе растяжения образца вели периодическую видеосъемку поверхности с частотой 2 кадра/с при разрешении 2400×2000 пикселей. Последовательный автоматизированный анализ полученной серии изображений с помощью программного обеспечения позволяет восстановить поле смещений точек спекл-рисунка на рабочей части образца в процессе растяжения, по величине которых можно рассчитать тензор деформации $\varepsilon_{\text{опт}}$ в любой точке в любой момент времени [8]:

$$\varepsilon_{\text{опт},j} = \frac{dV_i}{dr_j}, \quad (3)$$

где $i, j = 1, 2, 3$ — порядковые номера элементов тензора, соответствующие осям x, y, z ; r_j — компоненты пространственного вектора по осям; V_i — компоненты рассчитанного при обработке смещения по осям.

Отслеживая кинетику изменения поля деформаций во времени, можно с учетом машинных данных по приложенному усилию построить упругий участок диаграммы растяжения и оценить значение модуля нормальной упругости в любом временном интервале на любой стадии испытания:

$$E_M = \sigma / \varepsilon_{\text{опт}}. \quad (4)$$

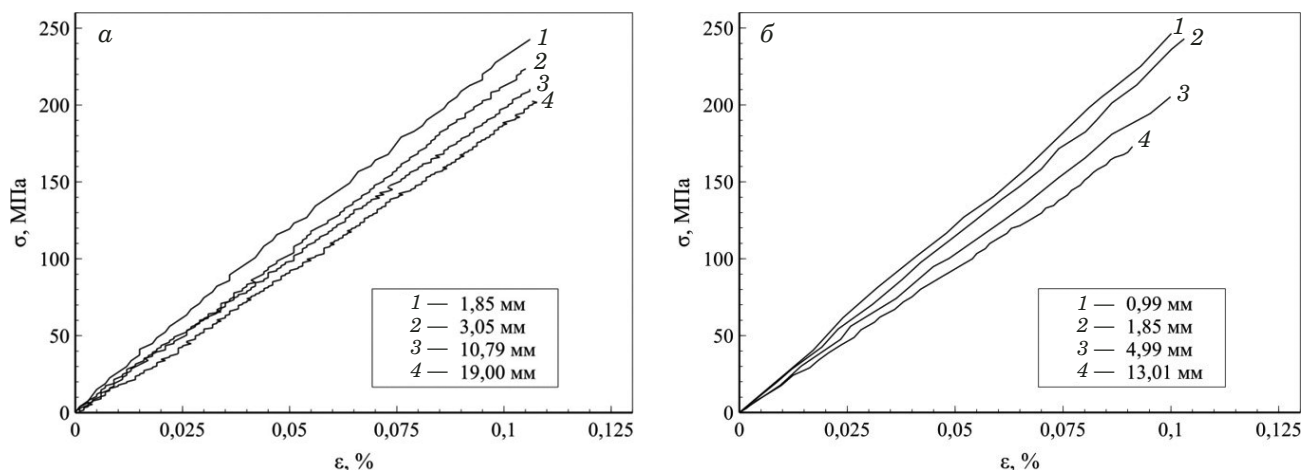


Рис. 4. Упругие участки диаграмм растяжения $\sigma - \varepsilon$, полученные с использованием навесного экстензометра (а) и методом корреляции цифровых изображений (б), для образцов с разными диаметрами d_0 рабочей части; материал — сталь 45

Fig. 4. Elastic sections of tension diagrams $\sigma - \varepsilon$ obtained using a mounted extensometer (a) and digital image correlation method (b), for samples with different diameters of the working part d_0 ; material — steel 45

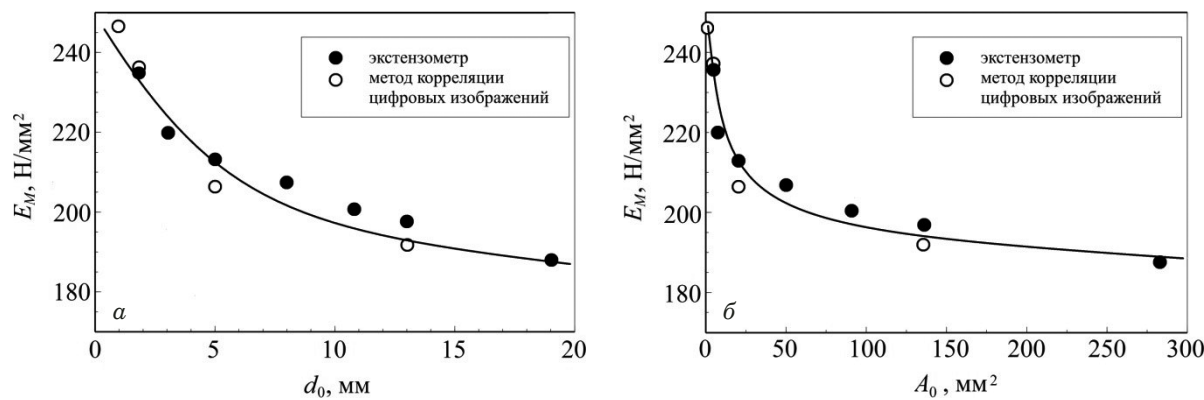


Рис. 5. Зависимости модуля упругости E_m от исходного диаметра образца d_0 (а) и от поперечного сечения образца A_0 (б); материал — сталь 45

Fig. 5. Dependence of Young’s modulus E_m on the initial specimen diameter d_0 (a) and the specimen cross-section A_0 (b); material — steel 45

В качестве значения модуля нормальной упругости, определенного методом корреляции цифровых изображений, принимали среднее арифметическое всех значений E_m , зарегистрированных на начальном участке растяжения до напряжения $\sigma \approx 200$ МПа.

Обсуждение результатов

На рис. 4, а показаны упругие участки диаграммы растяжения $\sigma - \varepsilon$ для образцов диаметрами d_0 , равными: 10,79, 3,05 и 1,85 мм, определенные с использованием навесного экстензометра. Отчетливо видно расслоение прямолинейных упругих участков диаграмм растяжения для образцов с разными исходными диаметрами d_0 . Причем чем меньше диаметр образца, тем больше угол наклона прямой, а следовательно, — и модуль нормальной упругости. Аналогичные результаты получены и с помощью измерений, выполненных методом корреляции цифровых

изображений (рис. 4, б). В таблице представлены результаты определения модуля нормальной упругости E_m для образцов, испытанных с использованием обоих методов измерений.

Видно, что значения E_m , определенные с использованием экстензометра и метода корреляции цифровых изображений, достаточно близки для одних и тех же диаметров образца. Более наглядное представление об изменении E_m при разных d_0 можно получить из рис. 5. Поскольку d_0 однозначно связан с площадью поперечного сечения A_0 цилиндрического образца ($A_0 = \pi d_0^2 / 4$), зависимости E_m от A_0 и E_m от d_0 сходны (см. рис. 5). Однако форма поперечного сечения образцов может различаться, поэтому целесообразно выявлять влияние масштабного фактора сопоставлением E_m с A_0 . Тогда можно получить более общую связь E_m с A_0 , в том числе и для образцов с другой формой поперечного сечения, например прямоугольной.

Результаты определения модуля нормальной упругости E_m стали 45, полученные растяжением образцов с использованием навесного экстензометра и метода корреляции цифровых изображений (средние значения)

The results of determining Young’s modulus E_m of steel 45 by tension tests with extensometer and the digital image correlation method (average values)

d_0 , мм	A_0 , мм ²	E_m			
		Использование экстензометра		Метод корреляции цифровых изображений	
		Н/мм ²	кг/мм ²	Н/мм ²	кг/мм ²
19,00	283,4	187 528	19 116	—	—
13,01	132,9	197 229	20 105	191 768	19 555
10,79	91,4	200 217	20 409	—	—
8,00	50,2	209 578	21 364	—	—
4,99	19,6	212 897	21 702	206 187	21 025
3,05	7,3	219 556	22 381	—	—
1,85	2,7	235 463	24 001	235 803	24 045
0,99	0,8	—	—	246 320	25 118

Анализ результатов определения модуля нормальной упругости E_m (см. таблицу) позволяет сделать следующие выводы. С уменьшением исходного диаметра образца d_0 значения модуля нормальной упругости E_m увеличиваются. Однако если при уменьшении d_0 от 19 и до 5 мм увеличение E_m сравнительно небольшое (примерно 10 %), то при меньших d_0 оно происходит более интенсивно. Для образца с $d_0 = 1,85$ мм это увеличение составляет уже около 20 %, а для образца с $d_0 = 0,99$ мм — около 25 %. Можно полагать, что при $d_0 \ll 1$ мм будет происходить еще более интенсивное увеличение E_m .

По мнению авторов данной работы, основная причина увеличения E_m с уменьшением d_0 состоит во влиянии масштабного фактора. Следует отметить, что масштабный фактор оказывает примерно такое же влияние и на другие механические характеристики материалов, определенные на образцах разных диаметров. Так, например, в исследованиях А. А. Гриффитса [9], а также А. П. Александрова и С. Н. Журкова [10] было установлено значительное повышение сопротивления отрыву стеклянных нитей с уменьшением их диаметра. А в работах [11, 12] отмечено повышение истинного сопротивления отрыву и истинного сопротивления разрыву стальных образцов с уменьшением их диаметров. Согласно [11], истинное сопротивление разрыву образца из стали 30ХН3 диаметром 1,5 мм возросло примерно на 30 % по сравнению со значением этой характеристики для образца диаметром 15 мм. Примерно такое же повышение предела текучести и временного сопротивления установлено при уменьшении диаметра образца с 10 мм до 1,5 мм [8]. Известны масштабные зависимости твердости материалов [13–16]. При определении твердости вдавливанием пирамиды на микроуровне ее значения сильно увеличиваются по сравнению с макроуровнем. А при переходе на наноуровень индентирования твердость может возрасти на порядок величины и более [14]. Сильное влияние масштабного фактора проявляется и при циклических испытаниях образцов разного диаметра при амплитуде цикла менее предела упругости [17]. Таким образом, можно предположить, что масштабный фактор оказывает влияние и на модуль нормальной упругости.

Существуют различные подходы к объяснению причин влияния масштабного фактора на механические свойства материалов [10]. Среди этих подходов можно назвать статистический (большее количество дефектов разного происхождения в объеме крупного образца), структурно-механический (неоднородность структуры, свойств материалов, распределения напряжений и деформаций по сечению образца), энергетический (различие в запасе упругой энергии).

В монографии Б. Б. Чечулина [12] впервые был систематизирован большой объем экспериментальных данных по влиянию размеров образцов на механические свойства и рассмотрены теории масштабного эффекта механической прочности для вязкого и хрупкого разрушения материалов.

Некоторые положения вышеперечисленных подходов к объяснению влияния масштабного фактора можно применить и для модуля нормальной упругости. Вместе с тем в малых образцах (микрообразцах) количество исходных дефектов и несовершенств кристаллического строения металла на атомном уровне, включая дислокации, значительно меньше, что приводит к увеличению жесткости кристаллической решетки, а следовательно, к повышению модуля нормальной упругости.

Заключение

Выполнено определение модуля нормальной упругости образцов разного диаметра из стали 45 растяжением с использованием экстензографа и метода корреляции цифровых изображений для измерения деформаций. Показано, что значения модуля нормальной упругости, определенные с использованием экстензографа и метода корреляции цифровых изображений, достаточно близки. Это позволяет использовать метод корреляции цифровых изображений для нахождения модуля нормальной упругости на малых образцах, на которые невозможно надежно установить навесной экстензограф. Установлено снижение модуля нормальной упругости с увеличением диаметра образца. Например, при увеличении диаметра образца с 0,99 до 19 мм модуль нормальной упругости понижается примерно на 25 %. Получены графические зависимости модуля нормальной упругости от диаметра образца и площади его поперечного сечения. Основная причина повышения или уменьшения модуля нормальной упругости, определенного на образцах разного диаметра, состоит во влиянии масштабного фактора. Это влияние необходимо учитывать при расчетах на прочность деталей и конструкций различных размеров. Особенно это важно для крупногабаритных изделий.

Исследование выполнено в ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00590, <https://rscf.ru/project/22-19-00590>

ЛИТЕРАТУРА

1. Husain A., La P., Hongzheng Y., Jie S. Influence of temperature on mechanical properties of nanocrystalline 316L stainless steel investigated via molecular dynamics simulations / Materials. 2020. Vol. 13. N 12. P. 2803. DOI: 10.3390/ma13122803

2. **Wang W., Liu B., Kodur V.** Effect of temperature on strength and elastic modulus of high-strength steel / *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2013. Vol. 25. N 2. P. 174 – 182. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000600
3. **Tromans D.** Elastic anisotropy of HCP metal crystals and polycrystals / *Int. J. Recent Res. Appl. Stud.* 2011. Vol. 6. N 4. P. 462 – 483.
4. **Gol'dshtein R. V., Mokryakov V. V., Chentsov A. V., et al.** Anisotropy of the effective elastic modulus of a steel plate with a lattice of circular holes / *Russian Metallurgy (Metally)*. 2017. P. 838 – 841. DOI: 10.1134/S0036029517100068
5. **Rozanski A., Rajczakowska M., Serwicki A.** The influence of microstructure geometry on the scale effect in mechanical behaviour of heterogeneous materials / *J. Composite Mater.* 2017. Vol. 24. N 4. P. 557 – 571. DOI: 10.1515/secm-2015-0007
6. **Petrova Y., Perez-Juste J., Zhang Z., et al.** Crystal structure dependence of the elastic constants of gold nanorods / *J. Mater. Chem.* 2006. Vol. 16. P. 3957 – 3963. DOI: 10.1039/B607364F
7. **Vogl L. M., Schweizer P., Richter G., Spiecker E.** Effect of size and shape on the elastic modulus of metal nanowires / *MRS Advances*. 2021. Vol. 6. P. 665 – 673. DOI: 10.1557/s43580-021-00103 – 3
8. **Sutton M. A., Orteu J. J., Schreier H.** Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications. — NY: Springer New York, 2009. — 322 p.
9. **Griffith A. A.** The phenomena of rupture and flow in solids / *Proc. Roy. Soc. Lond.* 1921. Vol. 221. P. 163. DOI: 10.1098/rsta.1921.0006
10. **Александров А. П., Журков С. Н.** Явление хрупкого разрыва. — М.: Гос. техн.-теоретич. изд-во, 1933. — 52 с.
11. **Шевандин Е. М., Маневич Ш. С.** Эффект масштаба при хрупком разрушении стали / *Журнал технической физики*. 1946. Т. XVI. С. 1223 – 1234.
12. **Чечулин Б. Б.** Масштабный фактор и статистическая природа прочности твердых тел. — М.: Металлургиздат, 1963. — 120 с.
13. **Матюнин В. М.** Индентирование в диагностике механических свойств материалов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2015. — 288 с.
14. **Atkinson M. J.** Phenomenology of the size effect in hardness tests with a blunt pyramidal indenter / *J. Mater. Sci.* 1998. N 33. P. 2937 – 2947.
15. **Федосов С. А., Пешек Л.** Определение механических свойств материалов микроиндентированием. — М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 2004. — 98 с.
16. **Головин Ю. И.** Наноиндентирование и его возможности. — М.: Машиностроение, 2009. — 312 с.
17. **Матюнин В. М., Марченков А. Ю., Казанцев А. Г. и др.** Статическая, динамическая и циклическая прочность металла шпильки крупных гидроагрегатов / *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2015. Т. 81. № 9. С. 59 – 66.
- steel investigated via molecular dynamics simulations / *Materials*. 2020. Vol. 13. N 12. P. 2803. DOI: 10.3390/ma13122803
2. **Wang W., Liu B., Kodur V.** Effect of temperature on strength and elastic modulus of high-strength steel / *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2013. Vol. 25. N 2. P. 174 – 182. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000600
3. **Tromans D.** Elastic anisotropy of HCP metal crystals and polycrystals / *Int. J. Recent Res. Appl. Stud.* 2011. Vol. 6. N 4. P. 462 – 483.
4. **Gol'dshtein R. V., Mokryakov V. V., Chentsov A. V., et al.** Anisotropy of the effective elastic modulus of a steel plate with a lattice of circular holes / *Russian Metallurgy (Metally)*. 2017. P. 838 – 841. DOI: 10.1134/S0036029517100068
5. **Rozanski A., Rajczakowska M., Serwicki A.** The influence of microstructure geometry on the scale effect in mechanical behaviour of heterogeneous materials / *J. Composite Mater.* 2017. Vol. 24. N 4. P. 557 – 571. DOI: 10.1515/secm-2015-0007
6. **Petrova Y., Perez-Juste J., Zhang Z., et al.** Crystal structure dependence of the elastic constants of gold nanorods / *J. Mater. Chem.* 2006. Vol. 16. P. 3957 – 3963. DOI: 10.1039/B607364F
7. **Vogl L. M., Schweizer P., Richter G., Spiecker E.** Effect of size and shape on the elastic modulus of metal nanowires / *MRS Advances*. 2021. Vol. 6. P. 665 – 673. DOI: 10.1557/s43580-021-00103 – 3
8. **Sutton M. A., Orteu J. J., Schreier H.** Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications. — NY: Springer New York, 2009. — 322 p.
9. **Griffith A. A.** The phenomena of rupture and flow in solids / *Proc. Roy. Soc. Lond.* 1921. Vol. 221. P. 163. DOI: 10.1098/rsta.1921.0006
10. **Aleksandrov A. P., Zhurkov S. N.** Brittle fracture phenomenon. — Moscow: Gos. tekhn.-teor. izd., 1933. — 52 p. [in Russian].
11. **Shevandin E. M., Manevich Sh. S.** Scale effect in brittle fracture of steel / *Zh. Tekhn. Fiz.* 1946. Vol. XVI. P. 1223 – 1234 [in Russian].
12. **Chechulin B. B.** The scale factor and the statistical nature of the strength of solids. — Moscow: Metallurgizdat, 1963. — 120 p. [in Russian].
13. **Matyunin V. M.** Indentation in diagnostics of mechanical properties of materials. — Moscow: Izd. dom MЭИ. 2015. — 288 p. [in Russian].
14. **Atkinson M. J.** Phenomenology of the size effect in hardness tests with a blunt pyramidal indenter / *J. Mater. Sci.* 1998. N 33. P. 2937 – 2947.
15. **Fedosov S. A., Peshek L.** Determination of mechanical properties of materials by microindentation. — Moscow: MGU im. M. V. Lomonosova, 2004. — 98 p. [in Russian].
16. **Golovin Yu. I.** Nanoindentation and its possibilities. — Moscow: Mashinostroenie, 2009. — 312 p. [in Russian].
17. **Matyunin V. M., Marchenkov A. Yu., Kazantsev A. G., et al.** Static, dynamic and cyclic strength of metal of large hydraulic unit studs / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2015. Vol. 81. N 9. P. 59 – 66 [in Russian].

REFERENCES