

Сапожников С.Б., Лешков Е.В., Иванов М.А., Ярославцев С.И., Щербаков И.А. Экспериментальная и расчетная оценка кратковременной прочности образцов из пластичного материала с U- и V-образными острыми надрезами // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2018. – № 2. – С. 96–106. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.2.09

Sapozhnikov S.B., Leshkov E.V., Ivanov M.A., Yaroslavtsev S.I., Shcherbakov I.A. Experimental and FEA short-term tensile strength assessment of U- and sharp V-notched specimens made of ductile material. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2018, no. 2, pp. 96-106. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.2.09



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 2, 2018

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI: 10.15593/perm.mech/2018.2.09

УДК 539.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ И РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА КРАТКОВРЕМЕННОЙ ПРОЧНОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ ПЛАСТИЧНОГО МАТЕРИАЛА С U- И V-ОБРАЗНЫМИ ОСТРЫМИ НАДРЕЗАМИ

С.Б. Сапожников, Е.В. Лешков, М.А. Иванов, С.И. Ярославцев, И.А. Щербаков

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 07 июня 2018 г.
Принята: 26 июня 2018 г.
Опубликована: 29 июня 2018 г.

Ключевые слова:

острый V-образный надрез, U-образный надрез, прочность, термопласт, нелокальная теория прочности.

АННОТАЦИЯ

В работе проведены экспериментальные и расчётные исследования кратковременной прочности растягиваемых стержней из пластичного материала с U- и V-образными острыми надрезами. В качестве модельного материала выбран термопласт-акрил-бутадиен-стирол (АБС). Образцы диаметром около 5 мм получены на одношнековом экструдере плавлением гранул. В первом разделе работы изучена зависимость механических свойств АБС в широком диапазоне квазистатических скоростей деформирования (0,02–10 мин⁻¹). Показано, что в этих условиях при однократном нагружении материал можно считать упругопластическим с модулем упругости 2200 МПа, пределом текучести, равным 41 МПа и независимым от скорости деформирования с погрешностью не более 5 %. Для десятикратных образцов остаточные продольные деформации при разрушении составили 15–25 %, остаточное сужение поперечного сечения составило 30–50 %.

Образцы для испытаний имели U-образные надрезы с радиусом закругления 1,6 мм. Угол острых V-образных надрезов составлял 60°. Глубину односторонних надрезов варьировали в диапазоне 0–3,5 мм.

Получено, что предельная нагрузка, выдерживаемая образцами с V-образными вырезами, превышает соответствующую нагрузку образцов с U-образными вырезами той же глубины из-за большего стеснения пластических деформаций материала в зоне выреза. Вырезы глубиной до 0,7 мм практически не снижают предельной нагрузки отмеченных образцов.

Во втором разделе работы с помощью МКЭ выполнен расчёт кинетики упругопластического деформирования и разрушения с использованием нелокального подхода, явной схемы интегрирования в пакете ANSYS Workbench. Расчёты показали, что предельная нагрузка определяется лишь пределом текучести материала и конфигурацией выреза. Разрушение на части (в ANSYS – это технология удаления критически деформированных конечных элементов) происходит при меньших нагрузках, зависящих от ресурса пластичности материала и конфигурации выреза. Расчётные значения предельных и разрушающих нагрузок хорошо согласуются с экспериментальными данными. Методика может быть рекомендована для оценки прочности деталей сложной формы из пластичных материалов с произвольными концентраторами напряжений.

© ПНИПУ

© Сапожников Сергей Борисович – доктор технических наук, профессор, e-mail: sapozhnikovsb@susu.ru

Лешков Егор Валерьевич – студент, e-mail: sapozhnikovsb@susu.ru

Иванов Михаил Александрович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: ivanovma@susu.ru

Ярославцев Сергей Иванович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: iaroslavtcevs@susu.ru

Щербаков Игорь Александрович – старший преподаватель, e-mail: shcherbakovia@susu.ru

Sergey B. Sapozhnikov – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: sapozhnikovsb@susu.ru

Egor V. Leshkov – Student, e-mail: sapozhnikovsb@susu.ru

Mikhail A. Ivanov – CSc in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: ivanovma@susu.ru

Sergey I. Yaroslavtsev – CSc in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: iaroslavtcevs@susu.ru

Igor A. Shcherbakov – Senior Lecturer, e-mail: shcherbakovia@susu.ru



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

EXPERIMENTAL AND FEM SHORT-TERM TENSILE STRENGTH ASSESSMENT OF U- AND SHARP V-NOTCHED SPECIMENS MADE OF DUCTILE MATERIAL

S.B. Sapozhnikov, E.V. Leshkov, M.A. Ivanov, S.I. Yaroslavtsev, I.A. Shcherbakov

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 07 June 2018
Accepted: 26 June 2018
Published: 29 June 2018

Keywords:

a sharp V-shaped notch, U-shaped notch, strength, ductile material, non-local theory of strength.

ABSTRACT

In this work, the experimental and calculation studies of the short-time strength of tensile rods made of a plastic material with U- and V-shape sharp notches were made. Thermoplastic-acryl-butadiene-styrene (ABS) was chosen as the model material. Samples with a diameter of about 5 mm were obtained on a single-screw extruder by melting granules. In the first part of the paper, the dependence of the mechanical properties of ABS in a wide range of quasi-static strain rates (0.02 ... 10 min⁻¹) was studied. With these conditions, under single-step loading, this material can be considered as an elastoplastic one with an elastic modulus of 2200 MPa, with the yield strength of about 41 MPa and independent of the given strain rates with an error of less than 5 %. For the tested smooth samples, the residual longitudinal strain at rupture was 15 ... 25 %, the residual decreasing of a cross-section (necking) was 30 ... 50 %.

The next group of samples had U-notches with a radius of 1.6 mm. The angle of sharp V-notches was 60°. The depth of the single-sided notches was varied in the range of 0 ... 3.5 mm.

It is obtained that the ultimate load held by the samples with V-notches exceeds the corresponding load of the samples with U-notches of the same depth due to a greater constraint of the plastic strains in a notch zone. Notches up to 1 mm depth practically do not reduce the ultimate load of the samples.

In the second part of the work, with the help of the FEM, the elastic-plastic deformation and fracture kinetics were calculated using a non-local approach, an explicit integration scheme in the ANSYS Workbench package. The calculations showed that the ultimate load is determined only by the yield strength of the material and the configuration of the notch. Rupture of samples (in ANSYS this is the technology of removing critically deformed finite elements) occurred at lower loads, depending on the plasticity resource of the material and the configuration of the notch. The calculated values of the ultimate and rupture loads are in a good agreement with the experimental data. The technique can be recommended for evaluating the strength of complex shape samples of plastic materials with arbitrary stress concentrators.

© PNRPU

Введение

Проблема расчётной оценки прочности деталей, изготовленных из пластичных материалов с концентраторами напряжений, остаётся в центре внимания уже много десятилетий и широко освещена в научной литературе [1–9]. Для вырезов с известными радиусами закругления – это тема научной дисциплины, называемой конструкционной прочностью (Structural strength [10–12]), тогда как для острых вырезов (трещиноподобных или V-образных) – это предмет нелинейной механики разрушения (NLFM) со своей аксиоматикой и подходами [14–19], включая развивающиеся методы расширенных конечных элементов (XFEM) для прогнозирования траектории движения трещины [20–23].

В последнее десятилетие для оценки прочности деталей с произвольными концентраторами (включая трещиноподобные) получили развитие обобщающие подходы [24–27], сформулированные как теория критических состояний [28–31]. Эта теория основана на численном решении (МКЭ) задачи упругопластического деформирования детали (сетка конечных элементов заранее заданного, фиксированного для данного материала «критического» размера). Началом разрушения детали считается достижение в наиболее нагруженном элементе предельного значения некоторого параметра (наибольшего напряжения, де-

формации, энергии деформирования и т.д.). Этот подход хорошо согласуется с экспериментом для высокопрочных (и сравнительно малопластичных) конструкционных материалов [32–34].

Для ответственных деталей из весьма пластичных материалов типа малоуглеродистых сталей и, в частности, сварных соединений с дефектами (непроварами и подрезами) получили широкое распространение методы анализа предельных нагрузок, основанные на построении линий скольжения [35–37]. Следует, однако, отметить, что техника построения линий скольжения основана на материалах наблюдений за деформированием плоских образцов и не алгоритмизирована для трехмерных деталей с произвольными концентраторами напряжений. Имеются нерешённые проблемы и с большими перемещениями (геометрические нелинейности), а также с прогнозом нагрузок разрушения (разделения на части).

В связи с этим в данной работе на примере двух видов концентраторов U- и острых V-образных односторонних вырезов в растянутых круглых стержнях из весьма пластичного модельного материала (АБС-пластика с локальной деформацией разрушения около 50 %) выполнена экспериментальная и расчётная (МКЭ) оценка предельной нагрузки и нагрузки разрушения таких деталей в геометрически нелинейной постановке с моделированием разделения детали на части за счёт

удаления «разрушенных» конечных элементов, имеющих «критические» размеры. Это является развитием теории критических расстояний на процесс разрушения деталей с концентраторами напряжений.

1. Изготовление образцов

Наиболее качественные детали из АБС-пластика получают литьём под давлением в закрытые формы (технология плавления гранул и экструзии [38–39]). Нами использован лабораторный одношнековый экструдер, в котором из гранул размерами 1,5–2 мм при температуре зоны расплава $(210 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ производится стержень круглого поперечного сечения диаметром $(4,70 \pm 0,15) \text{ мм}$ со скоростью 30–40 мм/мин. Образцы для испытаний имели длину 100 мм и односторонние надрезы в средней части (рис. 1). U-образные надрезы радиусом 1,60 мм (шириной 3,2 мм при глубине более 1,6 мм) и острые V-образные вырезы с углом раствора 60° (радиус в вершине менее 10 мкм) были выполнены инструментом с алмазным напылением (diamond coating filing – DCF).

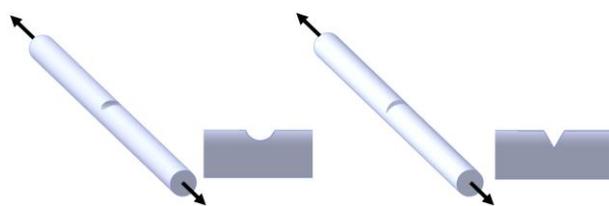


Рис. 1. Форма и способ нагружения образцов с U- и V-образными односторонними вырезами
Fig. 1. Shape and method of specimens' loading with U- and V-shaped one-side notches

2. Результаты испытаний образцов с анализом поверхности разрушения

Образцы без надрезов были испытаны на универсальной электромеханической машине Instron 5882 на монотонное растяжение до разрушения с квазистатическими скоростями движения активного захвата от 1 до 500 мм/мин при рабочей длине образцов 50 мм. В клиновидные захваты зажимали концевые участки длиной 25 мм. Для измерения деформаций использовали длинноходовой навесной экстензометр с базой 25 мм (рис. 2).

Неокрашенный АБС-пластик является полупрозрачным материалом, который белеет при развитых пластических деформациях в зоне шейки из-за появления микродефектов (см. стрелки на рис.2). Некоторые характерные диаграммы растяжения гладких образцов в диапазоне скоростей движения активного захвата 1–500 мм/мин (скорости деформации $0,000333\text{--}0,17 \text{ с}^{-1}$) приведены на рис. 3.

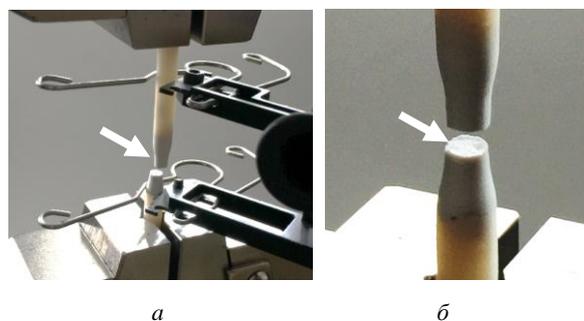


Рис. 2. Образец с экстензометром (а); разрушение с образованием шейки (б)
Fig. 2. The specimen with extensometer (a); fracture with a neck formation (b)

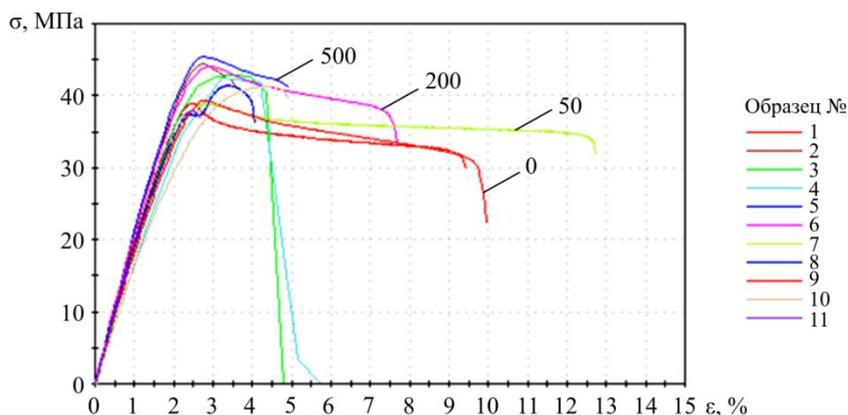


Рис. 3. Диаграммы «напряжение-деформация» гладких образцов. На кривых показаны скорости движения активного захвата, мм/мин
Fig. 3. Stress-strain diagrams of smooth specimens. The curves show the rates of an active grip movement, mm/min

Диаграммы растяжения характеризуются упругим участком, наличием «зуба текучести» и протяжённого участка развитой пластичности вплоть до разрушения. Зуб текучести является следствием быстрой трансформации кристаллической микроструктуры полимера под нагрузкой. Эта

трансформация протекает при практически постоянных истинных напряжениях [40, 41], но из-за сужения поперечного сечения нагрузка с ростом деформаций снижается.

Обработка диаграмм растяжения показала, что модуль упругости АБС составляет 2100–2300 МПа, предел

текучести/прочности равен (41 ± 2) МПа во всем диапазоне скоростей растяжения, относительное остаточное удлинение 5–13 %, остаточное сужение 30–50 %. Зави-

симость условного предела текучести/прочности (соответствует максимуму на зубе текучести) от скорости деформирования приведена на рис. 4.

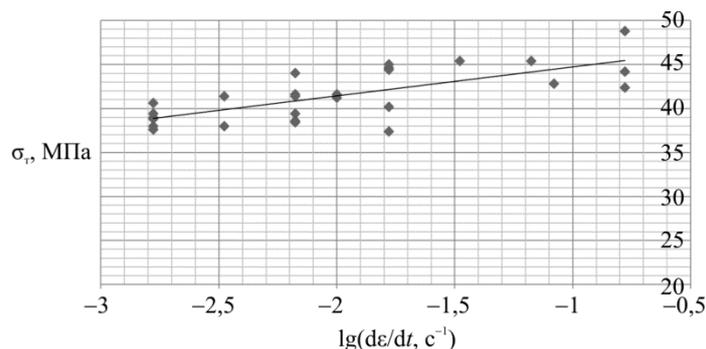


Рис. 4. Предел текучести в функции скорости деформации
Fig. 4. Yield strength vs strain rate

Слабое увеличение предела текучести с ростом скорости деформирования является следствием реологических явлений в материале. Однако изменением предела текучести на 14 % при изменении скорости растяжения на три десятичных порядка в дальнейших расчётах можно пренебречь и считать АБС-пластик при монотонном нагружении склерономным материалом, демонстрирующим практически идеальное упругопластическое поведение (в истинных напряжениях, рис. 5).

точного сужения площади поперечного сечения ψ , лежащего в пределах 30...50 %. Такая схематизация использована ниже, в части 3, в расчётах методом конечных элементов.

Растяжение образцов с надрезами происходило со скоростью 5 мм/мин. При надрезах глубиной до 1 мм образцы демонстрируют отчётливое упругопластическое поведение с зубом текучести (рис. 6), стрелки. Максимальная нагрузка на вершине зуба текучести является предельной нагрузкой.

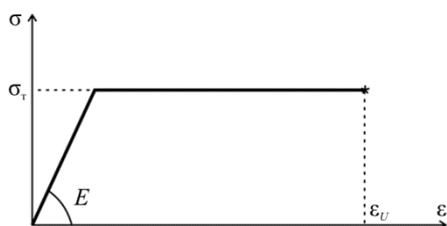


Рис. 5. Диаграмма растяжения АБС в истинных напряжениях
Fig. 5. ABS tension diagram in true stresses

Разрушение образцов происходит при достижении локальными деформациями критической величины $\epsilon_U = 50...100$ %, которое определено по величине оста-

С увеличением глубины надреза разрушение локализуется у дна выреза, диаграммы растяжения демонстрируют сравнительно слабую нелинейность.

Для образцов с V-образными вырезами имеет место аналогичная картина деформирования (рис. 7).

Разрушение образцов происходит при нагрузках (обозначено красными стрелками на рис. 6 и 7), которые заметно меньших предельных (черные стрелки)

Зависимости предельных P_u и разрушающих P_f нагрузок в функции l/D – относительной глубины U- и V-образных надрезов приведены на рис. 8 и 9. Здесь l и D – глубина надреза и диаметр образца, P_0 – предельная нагрузка гладкого образца.

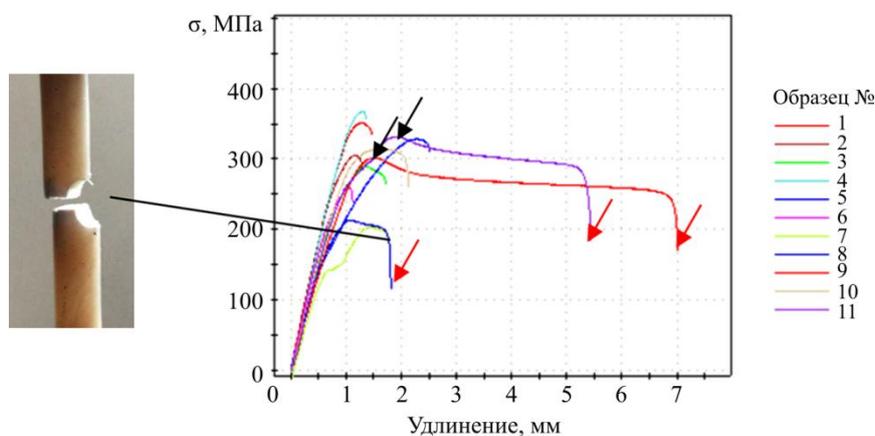


Рис. 6. Диаграммы растяжения образцов с U-образными вырезами
Fig. 6. Tension diagrams of specimens with U-shaped notches

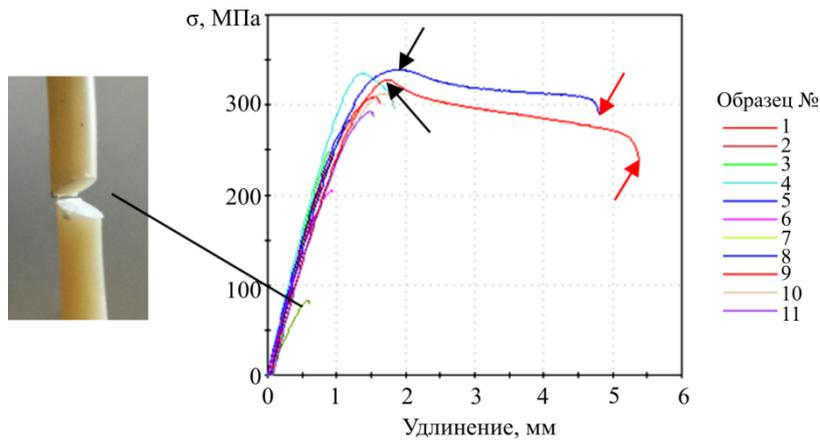


Рис. 7. Диаграммы растяжения образцов с V-образными вырезами
 Fig. 7. Tension diagrams of specimens with V-shaped notches

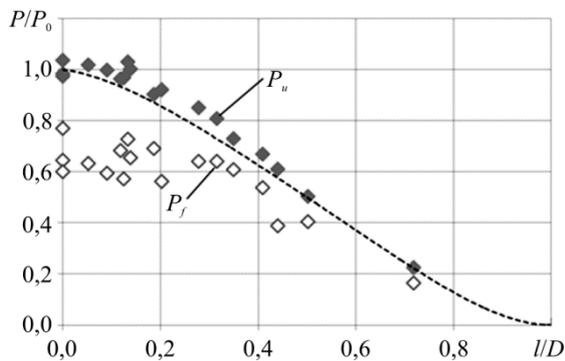


Рис. 8. Результаты испытаний образцов с U-образными вырезами
 Fig. 8. Test results of testing the specimens with U-shaped notches

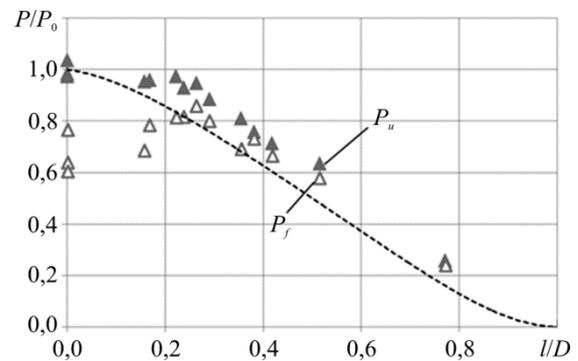


Рис. 9. Результаты испытаний образцов с V-образными вырезами
 Fig. 9. The test results for specimens with V-shaped notches

Пунктиром показано изменение площади поперечного сечения образцов в зоне вырезов, подтверждающее, что у гладкого образца с тем же сечением предельная нагрузка ниже, чем предельная нагрузка образца с вырезом. Это происходит за счёт стеснения пластических деформаций, так как в зоне выреза создаются условия для трёхосного напряжённого состояния с растягивающими компонентами. Острый V-образный вырез вызывает большее стеснение деформаций, чем U-образный, и имеет, соответственно, большую предельную

нагрузку (будет показано расчётом в следующем разделе). Вырезы глубиной до 0,5–0,7 мм практически не снижают предельную нагрузку, выдерживаемую образцами. Это свидетельствует о том, что микроструктура экструдированных образцов обладает неоднородностями с таким же линейным масштабом, что позволяет для расчётов МКЭ назначить величину «критического» расстояния (размер КЭ) на уровне 0,5 мм. На микрофотографиях поперечных сечений после разрушения эти неоднородности хорошо заметны (рис. 10).

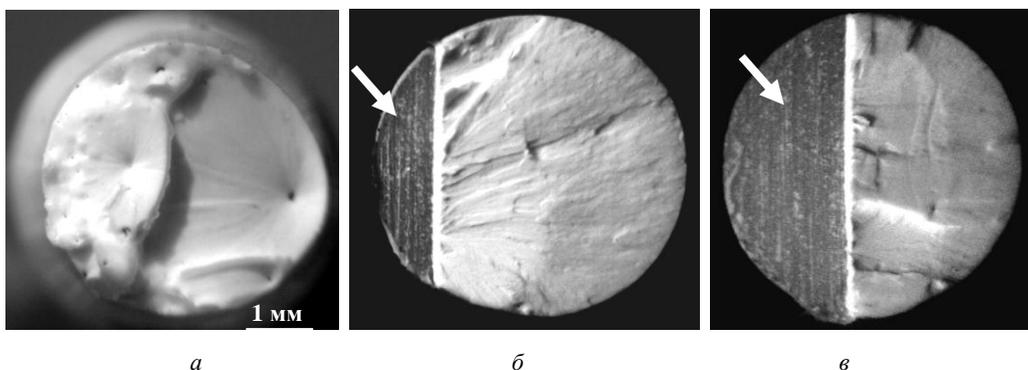


Рис. 10. Морфология поверхности разрушения в шейке (а) и в зоне надрезов глубиной 1 мм (б) и 2 мм (в); стрелка – область надреза
 Fig. 10. Fracture-surface morphology in the neck (a) and the zone of notches with the depth of 1 mm (b) and 2 mm (c); the arrow shows the notch area

Здесь видны источники разрушения – микропоры и созданные ими *гладкие пластические* каверны (а) и множественные лучи (б, в) – следы *квазихрупкого разрушения* из-за стеснения пластических деформаций у дна надрезов.

Нагрузки P_f полного разрушения (разделения на части, см. рис. 8 и 9) имеют существенно больший разброс по сравнению с предельными нагрузками, поскольку они определяются локальной микродефектностью АБС-пластика, созданной в процессе производства. Гранулы имеют некоторые загрязнения на поверхности, которые создают микродефекты после плавления и экструзии. Это является общим недостатком такой технологии, что подтверждается соответствием механических характеристик образцов АБС, полученных в данной работе, лучшим числовым значениям прочности и модуля упругости, представленным в литературе. Стоит отметить, что АБС-пластик широко используется в 3D-печати деталей [42], где образуются регулярно распределённые микропоры в зонах несплавления последовательно наносимых слоёв, и это приводит к полуторадвукратному падению прочности по сравнению со сплошным АБС-пластиком.

3. Расчётные исследования упругопластического деформирования и разрушения надрезанных образцов

3.1. Анализ напряжённого состояния в упругой области деформирования

Учитывая наличие неоднородной структуры АБС-пластика, будем пользоваться теорией критических расстояний в МКЭ (ANSYS Workbench) и назначим минимальный размер КЭ в зоне U- и V-образных острых вырезов равным 0,5 мм. При анализе напряжённо-деформированного состояния в пределах упругости материала будем везде ниже оценивать осреднённые по телу КЭ напряжения/деформации. Геометрическую нелинейность также не рассматриваем ввиду малости перемещений.

Коэффициент концентрации осреднённых напряжений K_S определяется как

$$K_S = S_{\max}/S_{\text{ном}}, \quad (1)$$

где S_{\max} и $S_{\text{ном}}$ – максимальное осреднённое и номинальное (в той же точке без концентратора) напряжения. Очевидно, что номинальные осреднённые напряжения и локальные (не осреднённые в точках тела) имеют одинаковые значения для рассматриваемого случая растяжения круглых образцов, так как при отсутствии концентратора во всём образце имеется равномерное распределение напряжений. Схема нагружения (кинематические граничные условия, две плоскости симметрии) и сетка КЭ для U-образного выреза приведены на рис. 11.

Для иллюстрации различия в распределении осреднённых и локальных напряжений на рис. 12 приведены картины распределения напряжений вдоль оси X для U- и V-образных вырезов одной глубины.

Здесь используются квадратичные 8-узловые тетраэдрические конечные элементы типа SOLID168. В терминах *локальных* напряжений данный тип КЭ может отобразить линейно изменяющееся напряжённое состояние по телу КЭ (рис. 12, б, з). Для *осреднённых* напряжений в КЭ выдаётся *mean stress* (рис. 12, а, в).

В осреднённых напряжениях образец с V-образным вырезом оказывается более прочным, чем с U-образным (коэффициент концентрации напряжений оказывается меньше для V-образного выреза). При использовании же локальных напряжений ситуация меняется на противоположную. Острый вырез с нулевым радиусом в вершине имеет при упругом поведении бесконечные напряжения – сингулярная задача линейной механики разрушения – LFM. Конечный элемент SOLID168 сингулярность корректно не отображает [43], но при уменьшении размера КЭ локальные напряжения будут неограниченно возрастать, косвенно подтверждая наличие сингулярности.

При упругом поведении материала и малых деформациях коэффициенты концентрации осреднённых напряжений K_S для U- и V-образных вырезов глубиной l и диаметром D приведены на рис. 13, кривые 1 и 2.

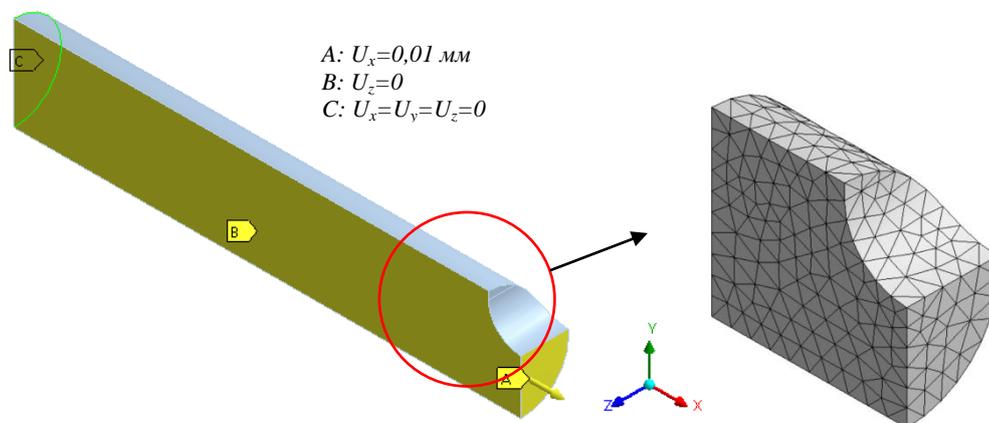


Рис. 11. Граничные условия и сетка КЭ у выреза
Fig. 11. Boundary conditions and FE mesh near the notch

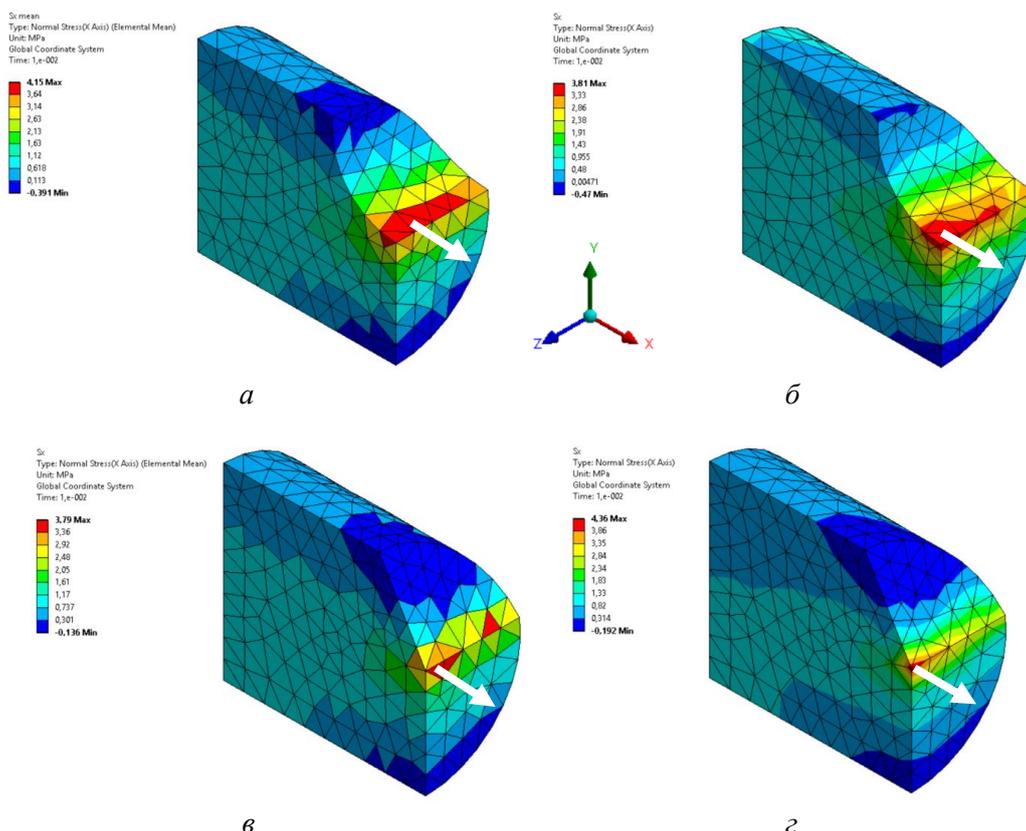


Рис.12. Осреднённые (а и в) и локальные (б и г) напряжения вдоль оси X; стрелками отмечены максимальные напряжения
 Fig. 12. Mean (a and c) and local (b and d) stresses along the X-axis; maximum stresses are marked by arrows

Следует отметить, что при явном моделировании разрушения в пакете ANSYS также используется осреднение напряжений/деформаций (КЭ с одной точкой интегрирования) и последующая технология исключения КЭ из сетки при достижении заданного условия разрушения [43].

3.2. Оценка нагрузок разрушения

Сочетание достаточно развитой пластичности при растяжении образцов с неглубокими вырезами и квазихрупкого разрушения при вырезах большей глубины заставляет рассматривать в расчётных подходах как кинетику деформирования, так и условия разрушения на фоне развитых пластических деформаций в зоне концентратора.

Используя представление об идеально упругопластическом поведении АБС-пластика и условие локального разрушения в деформациях (см. рис. 5), рассмотрим конечно-элементную постановку трёхмерной краевой задачи в пакете ANSYS Workbench в перемещениях (кинематическое нагружение в явной постановке (explicit formulation) с расчётом истории развития реакций в опоре во времени (рис. 14). Здесь на площадке А задано линейно возрастающее во времени перемещение от 0 до 1 мм.

На рис. 14 приведена лишь 1/4 часть образца для испытаний ввиду наличия двух плоскостей симметрии.

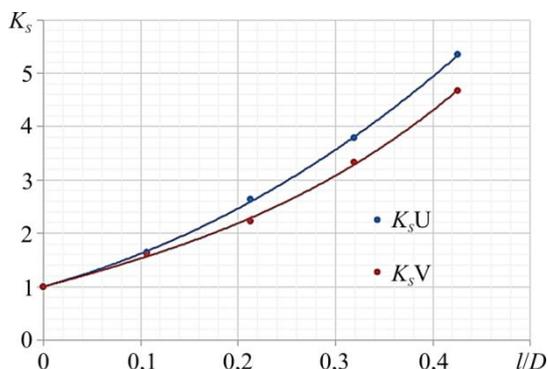


Рис. 13. Коэффициент концентрации осреднённых напряжений K_s в функции относительной глубины выреза
 Fig. 13. The coefficient of the mean stress concentration K_s in function of the relative depth of a notch

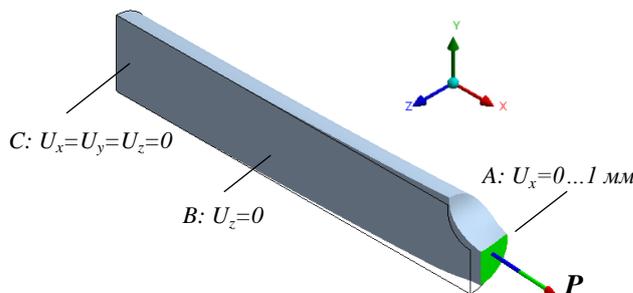


Рис. 14. Усилие P на площадке А для кинематического нагружения
 Fig. 14. The force P on the surface A for kinematic load

В пакете ANSYS Workbench в блоке *Engineering data* для АБС-пластика необходимо задать механические свойства как для изотропного материала, обладающего билинейной диаграммой деформирования: модуль упругости $E = 2200$ МПа (модуль упрочнения $E_T = 20$ МПа); коэффициент Пуассона $\mu = 0,4$; предел текучести $\sigma_T = 41$ МПа; с заданной деформацией разрушения ϵ^* .

Этот набор параметров однозначно идентифицирует математическую модель деформирования и разрушения АБС-пластика с минимально возможным набором параметров.

Для явной формулировки краевой задачи необходимо также задать время процесса нагружения, например $t = 0,0001$ с. А чтобы нагружение было квазистатическим (как в эксперименте), плотность следует искусственно уменьшить в 1000 раз (процедура *mass scaling*). В этом случае кинетическая энергия системы будет на несколько порядков меньше общей энергии системы, время расчёта будет менее 5 мин на типовом персональном компьютере с 8 Гб оперативной памяти.

Ниже приведён пример расчёта кинетики напряженно-деформированного состояния и нагрузки разрушения для образца с U-образным надрезом глубиной $l = 2$ мм, диаметр образца $D = 4,7$ мм, а полная длина $L = 50$ мм.

Функция нагрузки от времени (или перемещения) приведена для рассматриваемого образца на рис.15 для четырёх значений деформаций разрушения $\epsilon^* = 25, 50, 75$ и 100 %.

Предельная нагрузка 214,7 Н достигается при удлинении 0,412 мм (время 41,2 мкс), а разрушение происходит при различных нагрузках (удлинении), зависящих от критической деформации ϵ^* : на рис. 15 начало разрушения отмечено звёздочкой. Кинетика разрушения иллюстрируется рис. 16 в зоне надреза в разные моменты времени (показана динамика удаления разрушенных КЭ). Удаленные КЭ остаются в схеме вместе со своими инерционными параметрами (показано на рис. 16 точками).

В экспериментальных исследованиях нагрузки разрушения P_f характеризуются значительным разбросом, составляющим от 60 до 80 % от предельной нагрузки (см. рис. 8, 9). Поэтому для рассмотренного U-образного выреза глубиной 2 мм реалистичными будут деформации разрушения порядка 50–75 %. Для дальнейших расчётов примем деформацию разрушения $\epsilon^* = 75$ %.

Совмещая результаты экспериментов (синие точки) и расчётов (красные точки и линии), на рис. 17, а, б приведены данные по образцам с U- и V-образными надрезами различной глубины соответственно.

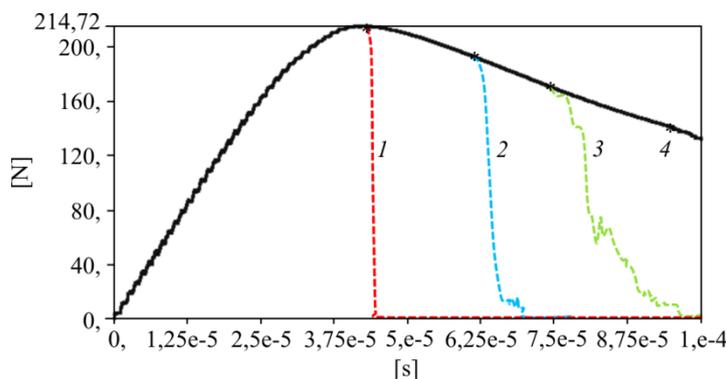


Рис. 15. Зависимости нагрузки от времени:
1 – $\epsilon^* = 25$ %; 2 – 50 %; 3 – 75 %; 4 – 100 %

Fig. 15. Load versus time: 1 – $\epsilon^* = 25$ %;
2 – 50 %; 3 – 75 %; 4 – 100 %

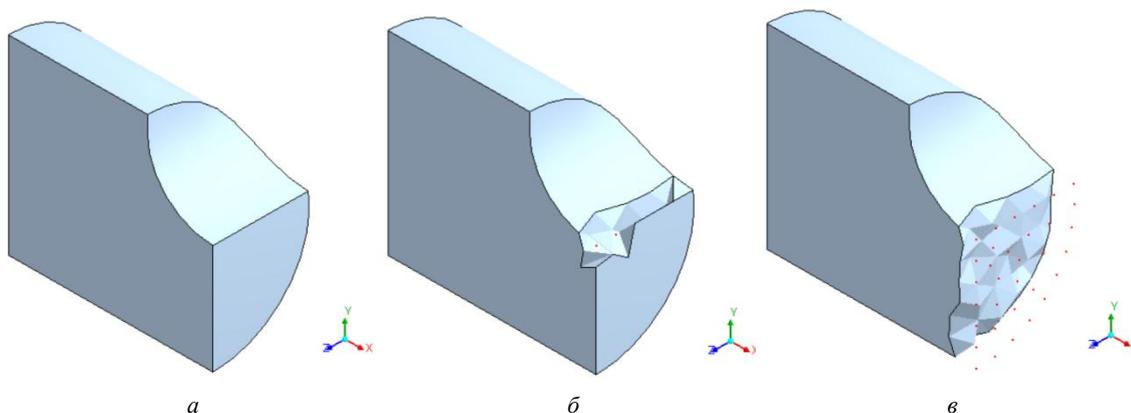


Рис. 16. Конфигурация зоны выреза, время: 42 мкс (а), 43 мкс (б), 44 мкс (в)
Fig. 16. The configuration of the notched zone, time: 42 μ s (a), 43 μ s (b), 44 μ s (c)

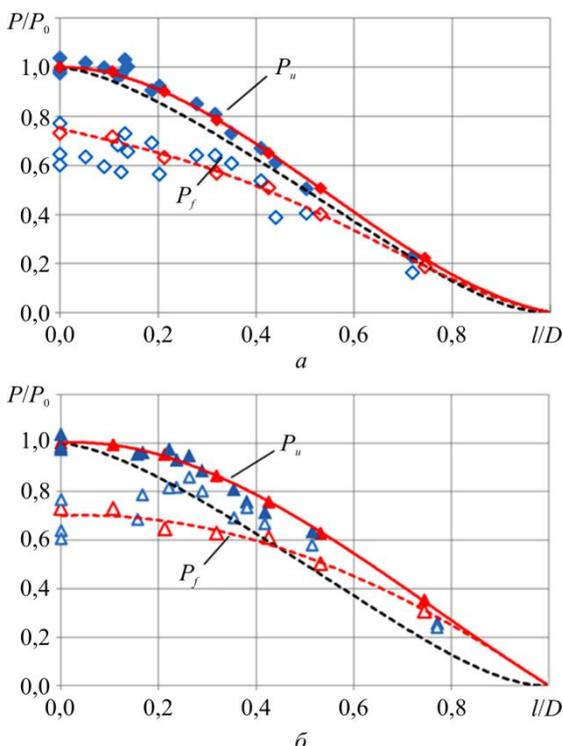


Рис. 17. Предельные и разрушающие нагрузки для образцов с U- и V-образными надрезами различной глубины
 Fig. 17. The ultimate and breaking loads for the specimens with U- and V-shaped notches of various

4. Анализ результатов и выводы

Проведённые в работе экспериментальные и расчётные исследования деформирования и разрушения стержней из АБС-пластика показали следующее:

Плавление гранул АБС при температуре 210 °С с последующим экструдированием со скоростью до 35 мм/мин позволяет получить качественный материал для экспериментальных исследований в виде стержня диаметром ~5 мм (может варьироваться при изменении диаметра фильеры экструдера).

При монотонном растяжении с квазистатическими скоростями деформирования в диапазоне 0,02–10 мин⁻¹ АБС-пластик можно считать упругопластическим склеронным материалом с модулем упругости 2200 МПа, модулем упрочнения 20 МПа и пределом текучести 41 МПа.

Библиографический список

1. Anderson T.L. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications, 2nd ed. – Florida: CRC Press LLC, 1995. – 669 p.
2. Hertzberg R.W. Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials. – New York: Wiley, 1976. – 810 p.
3. Knott J.F. Fundamentals of Fracture Mechanics. – New York: John Wiley – Halsted Press, 1973.
4. Strawley J.E., Brown W.F. Fracture Toughness Testing. – ASTM STP 381, 1965. – 133 p.
5. Gordon J.E. The New Science of Strong Materials, or Why You Don't Fall Through the Floor. – Princeton University Press, 1976.
6. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1967. – 744 с.

Разрушение гладких растягиваемых образцов происходит с образованием шейки, остаточное сужение площади поперечного сечения достигает 30–50 %, а продольных локальных деформаций – 50–100 %. Имеется разброс деформаций разрушения, который связан с локальной дефектностью микроструктуры образцов (поры и включения).

Высокая пластичность и слабое упрочнение АБС обусловили явное нелинейное механическое поведение образцов с U- (радиус закругления 1,6 мм) и острыми V-образными односторонними надрезами (угол в вершине 60°).

На диаграммах «нагрузка-удлинение» имеется максимум – предельная нагрузка, который определяется лишь пределом текучести и конфигурацией выреза. Разрушение происходит при меньшей на 15–20 % нагрузке.

Вырезы глубиной 0,5–0,7 мм не приводят к уменьшению предельной нагрузки.

Образцы с V-образными надрезами имеют большие предельные нагрузки по сравнению с образцами с U-образными надрезами, что обусловлено большим стеснением пластических деформаций.

Использование МКЭ (пакет ANSYS Workbench, explicit formulation), теории критических расстояний (фиксированный в зоне выреза размер КЭ – 0,5 мм с осреднением напряжений и деформаций по телу КЭ) и деформационного критерия разрушения КЭ (достижение первой главной деформацией величины 75 %) позволило получить адекватное натуре описание как зависимости предельных нагрузок от формы и глубины выреза, так и нагрузок разрушения.

Благодарности

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России. Номер для публикаций: 9.8080.2017/8.9.

Acknowledgements

The results were obtained within the State Assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation. The publication code is 9.8080.2017/8.9.

7. Филин А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела. – М.: Наука, 1975. – Т. 1. – 832 с.

8. Трусов П.В., Волегов П.С. Физические теории пластичности: теория и приложения к описанию неупругого деформирования материалов. Ч. 1. Жесткопластические и упругопластические модели // Вестник Пермского государственного технического университета. Механика. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2011. – № 1. – С. 5–45.

9. Трусов П.В., Волегов П.С. Физические теории пластичности: теория и приложения к описанию неупругого деформирования материалов. Ч. 2. Вязкопластические и упруговязкопластические модели // Вестник Пермского государственного

венного технического университета. Механика. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2011. – № 2. – С. 101–131.

10. Bazant Z.P. Scaling of Structural Strength. – Elsevier, 2005. – 336 p.

11. Panlilio F. Elementary Theory of Structural Strength. – John Wiley & Sons Inc, 1972. – 478p.

12. John C., Chilver A.H., Ross C.T.F. Strength of Materials and Structures, Fourth ed. – 1999. – 706 p.

13. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. – Новосибирск, 2005. – 493 с.

14. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.

15. Rolfe J.M., Stanley B.T. Fracture and fatigue control in structures: applications of fracture mechanics (3. ed.). – West Conshohocken, Pa.: ASTM. – 1999. – 519 p.

16. Campbell F.C. Fatigue and fracture: understanding the basics. – Materials Park, Ohio: ASM International. – 2012. – 525 p.

17. Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упругопластического разрушения. – М.: Наука, 1985. – 502 с.

18. Морозов Н.Ф. Математические вопросы механики трещин. – М.: Наука, 1984. – 256 с.

19. Данилов В.И., Нариманова Г.Н., Зуев Л.Б. Пластическое течение в зоне концентратора (трещины) в малоуглеродистой стали // Металлофизика и новейшие технологии. – 2000. – Т. 22, № 3. – С. 17–21.

20. Agathos K., Chatzi E., Bordas S.P.A. Multiple crack detection in 3D using a stable XFEM and global optimization // Computational Mechanics. – 2018. – P. 1–18. DOI:10.1007/s00466-017-1532-y

21. Xu B., Chen X., Waisman H. Crack propagation toward a desired path by controlling the force direction // Engineering Fracture Mechanics. – 2009. – Vol. 76(16). – P. 2554–2559. DOI:10.1016/j.engfracmech.2009.09.007

22. Eftekhari M., Baghbanan A., Hashemolhosseini H. Crack propagation in rock specimen under compressive loading using extended finite element method // Arabian Journal of Geosciences. – 2016. – Vol. 9(2). – P. 1–10. DOI:10.1007/s12517-015-2196-6

23. Шалимов А.С., Ташкинов М.А. Моделирование роста трещины в матрице неоднородной среды со случайным расположением включений при помощи метода XFEM // Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций: материалы XI Междунар. конф. – 2017. – 112 с.

24. Perez N. Fracture Mechanics 2nd ed. – Springer, 2016. – 418 p.

25. Jin C.T., Sun Z.-H. Fracture mechanics. – Waltham, MA: Academic Press, 2012. – 311 p.

26. Prediction of fracture loads in PMMA U-notched specimens using the equivalent material concept and the theory of critical distances combined criterion / S. Cicero, A.R. Torabi, V. Madrazo, P. Azizi // Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. – 2018. – Vol. 41(3). – P. 688–699. DOI:10.1111/ffe.12728

27. Louks R., Askes H., Susmel L. Static assessment of brittle/ductile notched materials: An engineering approach based on the theory of critical distances // Frattura Ed Integrita Strutturale. – 2014. – Vol. 30. – P. 23–30. DOI:10.3221/IGF-ESIS.30.04

28. Taylor D. The theory of critical distances. – 2007. – 284 p. DOI:10.1016/B978-0-08-044478-9.X5000-5

29. Susmel L., Taylor D. On the use of the theory of critical distances to estimate K_{Ic} and δK_{th} from experimental results generated by testing standard notches // Key Engineering

Materials. – 2010. – Vol. 417–418. – P. 25–28. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.417-418.25

30. Susmel L., Taylor D. The theory of critical distances to estimate the static strength of notched samples of Al6082 loaded in combined tension and torsion. part I: Material cracking behavior // Engineering Fracture Mechanics. – 2010. – Vol. 77(3). – P. 452–469. DOI:10.1016/j.engfracmech.2009.11.015

31. Louks R., Askes H., Susmel L. A generalised approach to rapid finite element design of notched materials against static loading using the theory of critical distances // Materials and Design. – 2016. – Vol. 108. – P. 769–779. DOI:10.1016/j.matdes.2016.07.047

32. Intrinsic material length, theory of critical distances and gradient mechanics: Analogies and differences in processing linear-elastic crack tip stress fields / H. Askes, P. Livieri, L. Susmel, D. Taylor, R. Tovo // Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. – 2013. – Vol. 36(1). – P. 39–55. DOI:10.1111/j.1460-2695.2012.01687.x

33. Pelekis I., Susmel L. The theory of critical distances to assess failure strength of notched plain concrete under static and dynamic loading // Engineering Failure Analysis. – 2017. – Vol. 82. – P. 378–389. DOI:10.1016/j.engfailanal.2017.07.018

34. Assessment of brittle fracture for PUR materials using local strain energy density and theory of critical distances / R. Negru, L. Marsavina, H. Filipescu, C. Căplescu, T. Voiconi // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2015. – Vol. 79. – P. 62–69. DOI:10.1016/j.tafmec.2015.07.011

35. Knothe K., Müller W. Some remarks on the elastic-plastic limit load analysis of a plane V-notched specimen // International Journal of Mechanical Sciences. – 1980. – Vol. 22(3). – P. 167–172. DOI:10.1016/0020-7403(80)90065-X

36. Zerbst U., Ainsworth R.A., Madia M. Reference load versus limit load in engineering flaw assessment: A proposal for a hybrid analysis option // Engineering Fracture Mechanics. – 2012. – Vol. 91. – P. 62–72. DOI:10.1016/j.engfracmech.2011.10.018

37. Писаренко Г.С., Можаровский Н.С. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести: справ. пособие – Киев: Наук. думка, 1981. – 496 с.

38. Spika T. The dynamic uni-layer melting model: A revolutionary advancement in plastics processing technology // Paper presented at the 23rd Annual International Conference and Exhibit: Vital Technologies for Business Success in a Changing Global Market, MOLDING 2013.

39. Wagner Jr. J.R., Mount III E.M., Giles Jr. H.F. Extrusion: The definitive processing guide and handbook: Second edition. Extrusion: The definitive processing guide and handbook: Second edition. – 2013. – P. 1–620. DOI:10.1016/C2010-0-67040-4

40. Capaccio G., Ward I.M. Preparation of ultra-high modulus linear polyethylenes; effect of molecular weight and molecular weight distribution on drawing behaviour and mechanical properties // Polymer. – 1974. – Vol. 15(4). – P. 233–238

41. Marikhin V.A., Myasnikova L.P. Structural Basis of High-Strength High-Modulus Polymers, Chapter 2, in book: Oriented polymer materials. Ed. S. Fakirov. – Wiley, 2008. – P. 38–98.

42. Chua C.K., Wong C.H., Yeong W.Y. Standards, Quality Control, and Measurement Sciences in 3D Printing and Additive Manufacturing. – 2017. – P. 1–250.

43. Yu M. Unified strength theory and its applications: Second edition. Unified strength theory and its applications: Second edition. – 2017. – P. 1–463. DOI:10.1007/978-981-10-6247-6

References

1. Anderson T.L. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications, 2nd ed. CRC Press LLC, 1995, 669 p.

2. Hertzberg R.W. Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials. Wiley, 1976, 810 p.

3. Knott J.F. Fundamentals of Fracture Mechanics. John Wiley – Halsted Press, 1973.

4. Strawley J.E., Brown W.F. Fracture Toughness Testing. ASTM STP 381, 1965, 133 p.

5. Gordon J.E. The new science of strong materials, or why you don't fall through the floor. Princeton University Press, 1976.

6. Rabotnov YU.N. Mekhanika deformiruyemogo tverdogo tela [Mechanics of a deformable solid]. Moscow, Nauka, 1967, 744 p.

7. Filin A.P. Prikladnaya mekhanika tverdogo deformiruyemogo tela [Applied mechanics of a solid deformable body]. *Moscow, Nauka*, 1975, vol.1, 832 p.
8. Trusov P.V., Volegov P.S. Crystal plasticity theories and their applications to the description of inelastic deformations of materials. Part 1: Rigid-plastic and elastoplastic theories. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2011, no. 1, pp. 5-45.
9. Trusov P.V., Volegov P.S. Crystal plasticity theories and their applications to the description of inelastic deformations of materials. Part 2: Viscoplastic and elastoviscoplastic theories. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2011, no. 2. pp. 101-131.
10. Bazant Z.P. Scaling of Structural Strength. *Elsevier*. 2005, 336 p.
11. Panlilio F. Elementary Theory of Structural Strength. *John Wiley & Sons Inc*, 1972, 478 p.
12. John C., Chilver A.H., Ross C.T.F. Strength of Materials and Structures, Fourth ed. 1999, 706 p.
13. Makhutov N.A. Konstruktsionnaya prochnost', resurs i tekhnogennaya bezopasnost' v 2-kh ch [Structural strength, resource and technogenic safety in 2 hours], Novosibirsk, 2005, 493 p.
14. Cherepanov G.P. Mekhanika khрупkogo razrusheniia [Mechanics of brittle fracture]. *Moscow, Nauka*, 1974, 640 p.
15. Rolfe J.M., Stanley B.T. Fracture and fatigue control in structures: applications of fracture mechanics (3. ed.). *ASTM*, 1999, 519 p.
16. Campbell F.C. Fatigue and fracture: understanding the basics. *ASM International*, 2012, 525 p.
17. Parton V.Z., Morozov E.M. Mekhanika uprugoplasticheskogo razrusheniya [Mechanics of elastoplastic fracture]. *Moscow, Nauka*, 1985, 502 p.
18. Morozov N.F. Matematicheskiye voprosy mekhaniki treshchin [Mathematical problems of fracture mechanics]. *Moscow, Nauka*, 1984, 256 p.
19. Danilov V.I., Narimanova G.N., Zuyev L.B. Plasticheskoye techeniye v zone kontsen-tratora (treshchini) v malouglerodistoy stali [The plastic flow in the zone of the concentrator (crack) in mild steel]. *Metallofizika i noveyshiye tekhnologii*, 2000, vol. 22, no. 3, pp. 17-21.
20. Agathos K., Chatzi E., Bordas S.P.A. Multiple crack detection in 3D using a stable XFEM and global optimization. *Computational Mechanics*, 2018, pp. 1-18. DOI:10.1007/s00466-017-1532-y
21. Xu B., Chen X., Waisman H. Crack propagation toward a desired path by controlling the force direction. *Engineering Fracture Mechanics*, 2009, Vol. 76(16), pp. 2554-2559. DOI:10.1016/j.engfracmech.2009.09.007
22. Eftekhari M., Baghbanan A., Hashemolhosseini H. Crack propagation in rock specimen under compressive loading using extended finite element method. *Arabian Journal of Geosciences*, 2016, Vol. 9(2), pp. 1-10. DOI:10.1007/s12517-015-2196-6
23. Shalimov A.S., Tashkinov M.A. Modelirovaniye rosta treshchin v matritse neod-norodnoy sredy so sluchaynym raspolozheniyem vkluycheniy pri pomoshchi metoda XFEM [Modeling of crack growth in a matrix of an inhomogeneous medium with a random arrangement of inclusions using the XFEM method]. *V sbornike: XI Mezhdunarodnaya konferentsiya «Mekhanika, resurs i dia-gnostika materialov i konstruktsiy»*, 2017, 112 p.
24. Perez N. Fracture Mechanics 2nd ed. *Springer*, 2016, 418 p.
25. Jin C.T., Sun Z.-H. Fracture mechanics. *Academic Press*. 2012, 311 p.
26. Cicero S., Torabi A.R., Madrazo V., Azizi P. Prediction of fracture loads in PMMA U-notched specimens using the equivalent material concept and the theory of critical distances combined criterion. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 2018, vol. 41(3), pp. 688-699. DOI:10.1111/ffe.12728
27. Louks R., Askes H., Susmel L. Static assessment of brittle/ductile notched materials: An engineering approach based on the theory of critical distances. *Frattura Ed Integrita Strutturale*, 2014, vol. 30, pp. 23-30. DOI:10.3221/IGF-ESIS.30.04
28. Taylor D. The theory of critical distances. 2007, 284 p. DOI:10.1016/B978-0-08-044478-9.X5000-5
29. Susmel L., Taylor D. On the use of the theory of critical distances to estimate K_{Ic} and δK_{Ih} from experimental results generated by testing standard notches. *Key Engineering Materials*, 2010, vol. 417-418, pp. 25-28. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.417-418.25
30. Susmel L., Taylor D. The theory of critical distances to estimate the static strength of notched samples of Al6082 loaded in combined tension and torsion. part I: Material cracking behavior. *Engineering Fracture Mechanics*, 2010, vol. 77(3), pp. 452-469. DOI:10.1016/j.engfracmech.2009.11.015
31. Louks R., Askes H., Susmel L. A generalised approach to rapid finite element design of notched materials against static loading using the theory of critical distances. *Materials and Design*, 2016, vol. 108, pp. 769-779. DOI:10.1016/j.matdes.2016.07.047
32. Askes H., Livieri P., Susmel L., Taylor D., Tovo R. Intrinsic material length, theory of critical distances and gradient mechanics: Analogies and differences in processing linear-elastic crack tip stress fields. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 2013, vol. 36(1), pp. 39-55. DOI:10.1111/j.1460-2695.2012.01687.x
33. Pelekis I., Susmel L. The theory of critical distances to assess failure strength of notched plain concrete under static and dynamic loading. *Engineering Failure Analysis*, 2017, vol. 82, pp. 378-389. DOI:10.1016/j.engfailanal.2017.07.018
34. Negru R., Marsavina L., Filipescu H., Căplescu C., Voiconi T. Assessment of brittle fracture for PUR materials using local strain energy density and theory of critical distances. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2015, vol. 79, pp. 62-69. DOI:10.1016/j.tafmec.2015.07.011
35. Knothe K., Müller W. Some remarks on the elastic-plastic limit load analysis of a plane V-notched specimen. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1980, vol. 22(3), pp. 167-172. DOI:10.1016/0020-7403(80)90065-X
36. Zerbst U., Ainsworth R.A., Madia M. Reference load versus limit load in engineering flaw assessment: A proposal for a hybrid analysis option. *Engineering Fracture Mechanics*, 2012, vol. 91, pp. 62-72. DOI:10.1016/j.engfracmech.2011.10.018
37. Pisarenko G.S., Mozharovskiy N.S. Uravneniya i krayevyye zadachi teorii pla-stichnosti i polzuchesti. Spravochnoye posobiye [Equations and boundary value problems of the theory of plasticity and creep. Reference Manual]. *Kiev, Nauk. Dumka*, 1981, 496 p.
38. Spika T. The dynamic uni-layer melting model: A revolutionary advancement in plastics processing technology. *Paper presented at the 23rd Annual International Conference and Exhibit: Vital Technologies for Business Success in a Changing Global Market*, MOLDING 2013.
39. Wagner Jr. J.R., Mount III E.M., Giles Jr. H.F. Extrusion: The definitive processing guide and handbook: Second edition. Extrusion: The definitive processing guide and handbook: Second edition, 2013, pp. 1-620. DOI:10.1016/C2010-0-67040-4
40. Capaccio G., Ward I.M. Preparation of ultra-high modulus linear polyethylenes; effect of molecular weight and molecular weight distribution on drawing behaviour and mechanical properties. *Polymer*, 1974, vol. 15(4), pp. 233-238
41. Marikhin V.A., Myasnikova L.P. Structural Basis of High-Strength High-Modulus Polymers, Chapter 2, in book: Oriented polymer materials, Ed. S. Fakirov. *Wiley*, 2008, pp. 38-98.
42. Chua C.K., Wong C.H., Yeong W.Y. Standards, Quality Control, and Measurement Sciences in 3D Printing and Additive Manufacturing, 2017, pp. 1-250.
43. Yu M. Unified strength theory and its applications: Second edition. Unified strength theory and its applications: Second edition, 2017, pp. 1-463. DOI:10.1007/978-981-10-6247-6