



Научная статья

DOI: 10.18287/2541-7525-2021-27-2-62-69

УДК 539.42



Дата: поступления статьи: 18.03.2021
после рецензирования: 21.04.2021
принятия статьи: 28.05.2021

Ю.А. Гербер

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), г. Новосибирск, Российская Федерация
E-mail: yu.gerber@sibstrin.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8846-9230>

А.Е. Нагель

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), г. Новосибирск, Российская Федерация
E-mail: a.nagel@edu.sibstrin.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2656-0140>

М.В. Табанюхова

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), г. Новосибирск, Российская Федерация
E-mail: tabanyukhova@sibstrin.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3279-8160>

ВЛИЯНИЕ РАДИУСА ЗАКРУГЛЕНИЯ ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ НА НАПРЯЖЕНИЯ

АННОТАЦИЯ

В экспериментальной механике при проведении исследований на моделях часто встаёт вопрос о том, правомерно ли заменять трещину пропилом, будет ли иметь большое влияние на величину напряжений вблизи его вершины радиус закругления разреза. Для того чтобы разобраться с этими вопросами и дать на них ответы, проведён ряд экспериментов на образцах из пьезооптического материала (оргстекла марки Э2). В моделях трещина имитировалась с помощью пропила, затем в вершине пропила сверлом делалось отверстие. Модели исследовались при чистом изгибе методом фотоупругости. Получены поля напряжений в двух партиях образцов при различных нагрузках. По экспериментальным данным определена интенсивность напряжений вблизи трещин-пропилов при различном радиусе закругления их вершин. Выполнена оценка влияния радиуса закругления вершины трещины-пропила на величину напряжений вблизи неё.

Ключевые слова: экспериментальная механика, модели, трещины, метод фотоупругости, напряженное состояние, концентраторы напряжений, пропилы, поля напряжений, пьезооптический материал.

Цитирование. Гербер Ю.А., Нагель А.Е., Табанюхова М.В. Влияние радиуса закругления вершины трещины на напряжения // Вестник Самарского университета. Естественнонаучная серия. 2021. Т. 27, № 2. С. 62–69. DOI: <http://doi.org/10.18287/2541-7525-2021-27-2-62-69>.

Информация о конфликте интересов: авторы и рецензенты заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Гербер Ю.А., 2021

Юрий Андреевич Гербер — старший преподаватель, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113.

© Нагель А.Е., 2021

Артур Евгеньевич Нагель — студент, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113.

© Табанюхова М.В., 2021

Марина Владимировна Табанюхова — кандидат технических наук, доцент кафедры строительной механики, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113.

Введение

В механике разрушения центральное место занимают зарождение и развитие трещин. В экспериментальных условиях трещину можно вырастить, но, если требуется исследовать напряжённое состояние вблизи трещины с определёнными параметрами, например, конкретной глубиной и углом наклона, то зачастую приходится имитировать трещину с помощью разреза или пропила. При экспериментальном решении задач о концентрации напряжений в том случае, когда речь идёт о геометрическом концентраторе напряжений, например таком, как вырез с острыми углами, также возникает вопрос о том, как влияет радиус закругления выреза на величину напряжений вблизи его вершины.

Решению задач прочности элементов строительных конструкций, имеющих геометрические концентраторы напряжений в виде трещин и угловых вырезов, посвящено большое количество научных исследований. В работе [1] представлены результаты изучения концентрации напряжений вблизи угловых вырезов в прямоугольных пластинах при одноосном сжатии, при варьировании угла выреза от 0° до 106° . Исследования, проведенные в рамках работы [1], выполнены методом фотоупругости, который позволяет получить поля напряжений как вблизи различных концентраторов напряжений (физических, геометрических), так и по всему полю модели. Исследования, результаты которых описаны в статье [2], представляют идею регулирования напряжений в балках с помощью заранее организованных трещин. В рамках работы методом фотоупругости были получены поля напряжений в моделях балок с различным числом и глубиной трещин-разрезов. Публикация [3] освещает результаты экспериментального исследования напряжённого состояния плоского элемента, имеющего геометрические концентраторы напряжений в виде выреза и трещин, образованных на контуре этого выреза. Получены поля напряжений в модели при различном количестве трещин-пропилы, а также вычислены коэффициенты концентрации напряжений.

Методом фотоупругости в работе [4] исследовано напряжённое состояние балок с подкрепляющим слоем из углепластика. В ходе исследования получены поля напряжений в моделях балок с трещинами, имеющими различный угол наклона. Выполнен анализ влияния подкрепляющего слоя на концентрацию напряжений вблизи вершин трещин-пропилы. Анализ экспериментальных и расчетных данных о коэффициентах концентрации напряжений приведён в статье [5]. В рамках этой работы численный расчёт производился при использовании программного комплекса SCAD, а экспериментальные исследования — с помощью метода фотоупругости. Представлены результаты исследования напряжённого состояния плоских моделей из пьезооптического материала с ромбическими вырезами и элементов стальных конструкций с различными геометрическими концентраторами (в последнем случае поля напряжений получены методом фотоупругих покрытий). Анализ коэффициентов интенсивности напряжений в балках с угловыми вырезами, определённых на основе данных численного и физического экспериментов (в последнем величина углового выреза варьировалась от 0° до 120°), приведены в работе [6]. Исследования, выполненные в рамках работы [7], направлены на оценку влияния круглого отверстия на напряженно-деформированное состояние у вершины трещины в плоском элементе, причём по концам трещины просверлены круглые отверстия. Пути снижения напряжений в балках при наличии дефектов описаны в статье [8], под дефектами понимаются в том числе и трещины, которые имитировались с помощью пропилов. В рамках работы [9] проведена большая серия экспериментов с помощью метода фотоупругости на различных моделях с трещинами и надрезами. С помощью закона фотоупругости вычислены коэффициенты многопараметрического асимптотического разложения М. Уильямса поля напряжений у вершины трещины. В работе [10] приведен ряд решений задач по определению напряженно-деформированного состояния в новых типах экспериментальных образцов на трёхточечный изгиб: полудиск с вертикальным и наклонным надрезом, а также полудиск с вертикальным надрезом с несимметричным расположением опор. Исследование [11] посвящено изучению влияния небольших круглых отверстий, которые моделируют поры, на величину напряжений у вершин трещины (с круглыми отверстиями в вершине) в зависимости от местоположения пор. Работа ориентирована на исследование состояния предразрушения материала вблизи трещины, а также изучение механизма ее подрастания и выявления причин торможения. В статье [12] представлены результаты, полученные методом фотоупругости, а именно поля напряжений в моделях элементов строительных конструкций с угловыми вырезами и коэффициенты концентрации напряжений. Фотоупругий анализ напряжённого состояния плоского элемента с геометрическими концентраторами напряжений в виде выреза при различном количестве трещин на его контуре и варьировании углов наклона этих трещин представлен в работе [13].

Во всех работах, приведённых выше, угловые вырезы вышивались, а трещины моделировались с помощью пропилов. Вопросы, касающиеся радиуса закругления вершин вырезов или трещин, в работах не рассмотрены. В связи с этим интерес к тому, как влияет радиус закругления выреза или пропила на величину напряжений вблизи их вершин, остаётся неудовлетворённым. Настоящая статья посвящена указанным выше вопросам, для получения ответов на них изготовлена модель из оргстекла марки Э2,

материал выбран не случайно, он обладает высокой пьезооптической чувствительностью. В качестве метода исследования напряжений используется метод фотоупругости, как и во всех упомянутых выше работах [10–13]. Трещины и вырезы относятся к геометрическим концентраторам напряжений, а метод фотоупругости как нельзя лучше позволяет исследовать напряженное состояние вблизи концентраторов [14]. При просвечивании образца из пьезооптического материала поляризованным светом получают картину полос интерференции. Интерференционная полоса соединяет между собой точки с одинаковой разностью главных в плоскости напряжений. Картина полос интерференции позволяет оценить напряжённое состояние вблизи концентраторов напряжений. Этот метод представляет общую картину распределения напряжений, являясь, по сути, методом тензометрии с нулевой базой измерения, когда тензометры дают усредненные сведения для определенных точек. Все эксперименты в рамках настоящего исследования выполнены на установке ППУ-7. Размеры модели в миллиметрах и схема нагружения приведены на рис. 1. Для исследования напряжённого состояния вблизи вершины трещины в модели балки на вертикальной оси симметрии сделан пропи́л, имитирующий трещину. Пропил глубиной 3 мм выполнен лобзиком. Проведена серия экспериментов на этой модели. Далее в вершине пропи́ла сверлом диаметром 0,4 мм сделано отверстие. На новой модели выполнена аналогичная серия экспериментов. Обе партии образцов испытаны на чистый изгиб при ступенчатом нагружении. Нагрузка менялась от 25 до 250 Н с шагом 25 Н. Материал модели работал исключительно в упругой стадии, после снятия нагрузки остаточных напряжений зафиксировано не было.

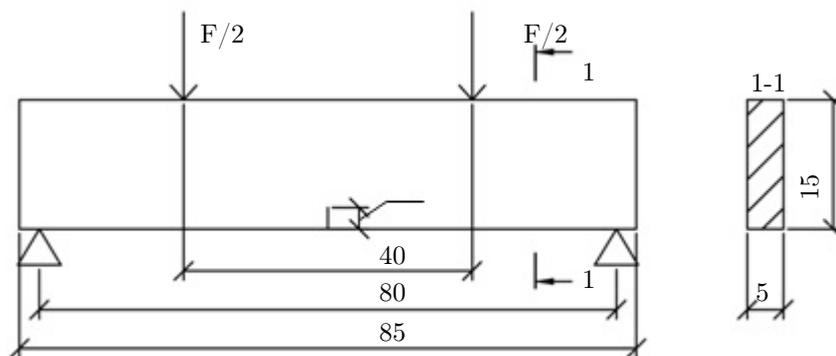


Рис. 1. Схема нагружения модели при чистом изгибе
 Fig. 1. Scheme of loading the model in pure bending

1. Результаты и их обсуждение

Во всех экспериментах при ступенчатом увеличении нагрузки посредством установки ППУ-7 при прямом просвечивании получены картины полос интерференции. На рис. 2 и 3 приведены фрагменты нескольких интерферограмм, зафиксированных с использованием зелёного фильтра (длина волны $\lambda = 541$ нм) при одинаковой нагрузке. В ходе работы сняты картины полос интерференции в скрещённом и параллельном поле поляризатора и анализатора в зелёном и белом свете, сделано это для более точного определения порядка полос. Первая серия экспериментов выполнена на модели балки с трещиной-пропиллом. На рис. 2 приведена картина полос интерференции в образце при нагрузке в 200 Н. Числовые значения 0, 1, 2 указывают на порядок полос. Нулевой порядок интерференционной полосы соответствует нейтральному слою волокон, в балке без повреждений при чистом изгибе его положение совпадает с горизонтальной осью симметрии. При ослаблении растянутой зоны трещиной-пропиллом нейтральный слой смещается в сжатую зону. В случае, представленном на рис. 2, максимальный порядок полос в сжатой зоне составляет 2,5. В растянутой зоне наибольшее напряжение возникает вблизи вершины трещины, ему соответствует порядок полосы – 3,5.

Вторая серия испытаний выполнена на модели с трещиной-пропиллом, имеющим закругление вершины (радиус 0,2 мм). Фрагмент картины полос интерференции при нагрузке 200 Н представлен на рис. 3. Вблизи вершины закруглённой трещины порядок полосы составил 5, что в сравнении с предыдущим случаем значительно больше (на 1,5 полосы).

С помощью картин полос интерференции определены порядки полос в двух партиях моделей при различной нагрузке, результаты, а именно максимальный порядок полосы у вершины трещины, представлены в виде таблицы. Закругление вершины трещины привело к увеличению напряжений, его зна-

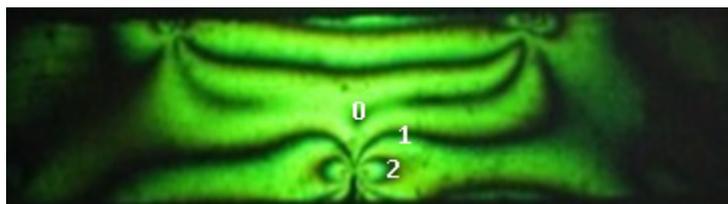


Рис. 2. Картина полос интерференции в образце с трещиной-пропилем, $F = 200$ Н
 Fig. 2. Pattern of interference bands in a sample with a crack-cut, $F = 200$ Н

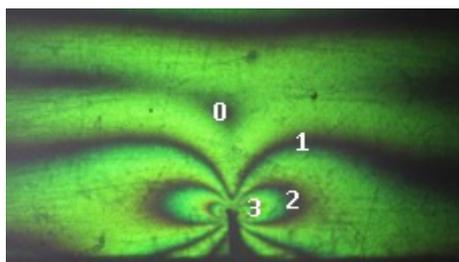


Рис. 3. Фрагмент картины полос интерференции в образце с трещиной-пропилем (диаметр закругления 0,4 мм), $F = 200$ Н
 Fig. 3. Fragment of the pattern of interference fringes in a sample with a crack-cut (rounding diameter 0.4 mm), $F = 200$ Н

чение в процентах указано в последнем столбце таблицы. Следует отметить, что чем выше нагрузка, тем больше градиент напряжений вблизи вершины пропила и тем сложнее определить порядок полосы.

Таблица
 Table

Порядок полос интерференции
Order of interference fringes

Степень нагружения	Нагрузка, Н	Максимальный порядок интерференционной полосы у вершины пропила		Увеличение полосы порядка, %
		Трещина-пропил без закругления вершины	Трещина-пропил с закруглением вершины	
1	25	0.5	0.8	60
2	50	1	1.5	50
3	75	1.5	2	25
4	100	2	2.5	33
5	125	2.5	4	60
6	150	3	4.5	50
7	175	3.3	4.5	36
8	200	3.5	5	43
9	225	4	5.2	30
10	250	43	5.5	28

Для большей наглядности зависимость порядка интерференционной полосы от нагрузки представлена графически на рис. 4. Верхний график соответствует модели с закруглённым пропилом, а нижний – образцу с пропилом без закругления вершины последнего.

Нижняя часть того и другого графика линейная, при увеличении нагрузки зависимость между нагрузкой и порядком полосы перестаёт быть линейной и приобретает нелинейный характер.

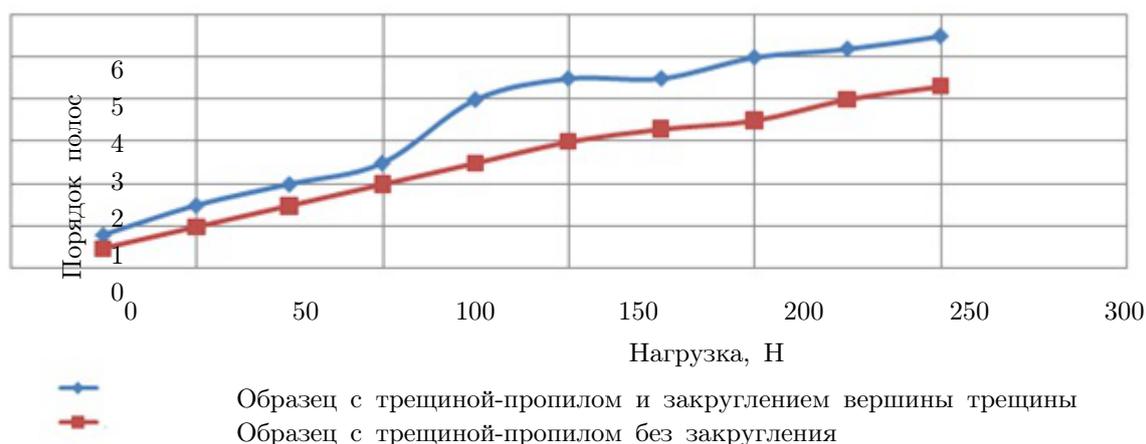


Рис. 4. Зависимость порядка интерференционной полосы от нагрузки
 Fig. 4. Dependence of the order of the interference fringe on the load

Заключение

В рамках настоящего исследования выполнен анализ напряжённого состояния моделей балок с пропилом, имитирующим трещину. Оценена интенсивность напряжений вблизи вершин пропилов как с закруглением (радиус 0,2 мм), так и без него. Экспериментально показано, что увеличение закругления в настоящем исследовании привело к росту напряжений вблизи вершины пропила. Вызвано это может быть тем, что ослабленным оказалось не только сечение с пропилом, но и ближайšie к нему сечения. Требуются дополнительные исследования в этом направлении, вопрос о влиянии радиуса закругления пропилов и вырезов на напряжения у их вершины остаётся открытым.

Литература

- [1] Табанюхова М.В. Решение задач прочности элементов сооружений с концентраторами методом фотоупругости: специальность 05.23.17 "Строительная механика": дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2006. 145 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16090854>.
- [2] Албаут Г.Н., Канышев Ю.И., Табанюхова М.В. Фотоупругий анализ напряженного состояния балок с трещинами // Проблемы оптимального проектирования сооружений: доклады 2-й Всероссийской конференции, Новосибирск, 05–06 апреля 2011 года // Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин); Сибирское отделение Российской академии архитектуры и строительных наук, Сибирское отделение международной академии наук высшей школы. Новосибирск: Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 2011. С. 28–35. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23254357>.
- [3] Зеркаль С.М., Табанюхова М. В. Фотоупругий анализ концентрации напряжений вблизи вершин трещин-пропилов // Инновации в жизнь. 2019. № 2(29). С. 126–133. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=40805553>.
- [4] Табанюхова М.В. Исследование напряжённого состояния балок с усиливающим слоем из углепластика // Механика композиционных материалов и конструкций. 2012. Т. 18. № 2. С. 248–254. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17830477>.
- [5] Албаут Г.Н., Барышников В.Н., Пангаев В.В., Табанюхова М.В., Харинова Н.В. Определение коэффициентов концентрации напряжений в нестандартных задачах поляризационно-оптическими методами // Физическая мезомеханика. 2003. Т. 6. № 6. С. 91–95. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=10424255>.
- [6] Tabanyukhova M.V., Pangaev V.V. Photoelastic analysis of mode I stress intensity factor in beams with angular notches // Fracture of Nano and Engineering Materials and Structures - Proceedings of the 16th European Conference of Fracture: 16, Alexandroupolis, 03–07 July's 2006 years. Alexandroupolis, 2006. P. 447–448. DOI: https://doi.org/10.1007/1-4020-4972-2_221.
- [7] Албаут Г.Н., Табанюхова М.В., Морозов Н.Ф., Проскура А.В., Ястребкова Н.А. Влияние круглого отверстия на напряженно-деформированное состояние у вершины трещины // Известия высших учебных заведений. Сер.: Строительство. 2000. № 9(501). С. 143–145. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35018209>.

- [8] Табанохова М.В. Снижение напряжений в балках при наличии дефектов // Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций: материалы XIV научно-методической конференции ВИТУ, Санкт-Петербург, 18 марта 2010 года / Военный инженерно-технический университет. Санкт-Петербург: Военный инженерно-технический университет, 2010. С. 104–108. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37089066>.
- [9] Степанова Л.В., Белова О.Н., Туркова В.А. Определение коэффициентов разложения М. Уильямса поля напряжений у вершины трещины с помощью метода цифровой фотоупругости и метода конечных элементов // Вестник Самарского университета. Естественнонаучная серия. 2019. Т. 25. № 3. С. 62–82. DOI: <http://doi.org/10.18287/2541-7525-2019-25-3-62-82>.
- [10] Степанова Л.В., Фролов К.В. Конечно-элементное исследование смешанного нагружения на примере полудиска с вертикальным и наклонным надрезами // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Сер.: Механика. 2018. № 3. С. 128–137. DOI: <http://doi.org/10.15593/perm.mech/2018.3.12>.
- [11] Албаут Г.Н., Проскура А.В., Табанохова М.В., Ястебкова Н.А. Изменение напряжений у вершин трещины из-за наличия в ее окрестности круглых пор // Научные труды II и III Международного конгресса "Ресурсо- и энергосбережение в реконструкции и новом строительстве"/ Сибирская ярмарка, Межрегиональная ассоциация "Сибирское соглашение", СО Рос. акад. архитектуры и строит. наук, Администрация Новосибирской обл., мэрия г. Новосибирска, Новосибирский государственный архитектурно-строительный ун-т. Новосибирск: Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 2000. С. 25–30. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25560955>.
- [12] Албаут Г.Н., Табанохова М.В. Модельное определение концентрации напряжений в элементах строительных конструкций с угловыми вырезами // Известия высших учебных заведений. Сер.: Строительство. 2006. № 10 (574). С. 107–112. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9311958>.
- [13] Tabanyukhova M.V. Photoelastic analysis of the stressed state of a flat element with geometrical stress concentrators (Cutout and cuts) // Key Engineering Materials. 2020. Vol. 827 KEM. P. 330–335. DOI: <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.827.330>.
- [14] Александров А.Я., Ахметзянов М.Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. Москва: Наука, 1973. 576 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35626697>.



Scientific article

DOI: 10.18287/2541-7525-2021-27-2-62-69

Submitted: 18.03.2021

Revised: 21.04.2021

Accepted: 28.05.2021

Y.A. Gerber

Novosibirsk State University of Architecture and

Civil Engineering (Sibstrin), Novosibirsk, Russian Federation

E-mail: yu.gerber@sibstrin.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8846-9230>

A.E. Nagel

Novosibirsk State University of Architecture and

Civil Engineering (Sibstrin), Novosibirsk, Russian Federation

E-mail: a.nagel@edu.sibstrin.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2656-0140>

M.V. Tabanyukhova

Novosibirsk State University of Architecture and

Civil Engineering (Sibstrin), Novosibirsk, Russian Federation

E-mail: tabanyukhova@sibstrin.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3279-8160>

INFLUENCE OF CURVATURE OF THE CRACK TIP RADIUS ON STRESSES

ABSTRACT

In experimental mechanics, when conducting research on models, the question often arises of whether it is legitimate to replace a crack with a cut, whether the radius of curvature of the cut will have a large effect on the magnitude of stresses near its apex. In order to understand these questions and give answers to them, a number of experiments were carried out on samples made of piezo-optical material (Plexiglass of E2 grade). In the models, the crack was simulated using a cut, then a hole was made at the top of the cut with a drill. The models were investigated in pure bending by the photoelasticity method. Stress

fields were obtained in two batches of samples at different loads. The intensity of stresses near cracks-cuts at different radius of curvature of their tops was determined by using the experimental data. An assessment of the influence of the crack-cut tip radius curvature on the magnitude of stresses near it has been carried out.

Key words: experimental mechanics; models; cracks; photo-elasticity method; stress state; stress concentrators; cuts; stress fields; piezo-optical material.

Citation. Gerber Y.A., Nagel A.E., Tabanyukhova M.V. Influence of curvature of the crack tip radius on stresses. *Vestnik Samarskogo universiteta. Estestvennonauchnaia seriia = Vestnik of Samara University. Natural Science Series*, 2021, vol. 27, no. 2, pp. 62–69. DOI: <http://doi.org/10.18287/2541-7525-2021-27-2-62-69>. (In Russ.)

Information about the conflict of interests: authors and reviewers declare no conflict of interests.

© Gerber Y.A., 2021

Yuriy A. Gerber — senior lecturer, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), 113, Leningradskaya Street, Novosibirsk, 630008, Russian Federation.

© Nagel A.E., 2021

Artur E. Nagel — student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), 113, Leningradskaya Street, Novosibirsk, 630008, Russian Federation.

© Tabanyukhova M.V., 2021

Marina V. Tabanyukhova — Candidate of Technical Sciences, associate professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), 113, Leningradskaya street, Novosibirsk, 630008, Russian Federation.

References

- [1] Tabanyukhova M.V. Solving problems of strength of elements of structures with concentrators by the method of photoelasticity: specialty 05.23.17 "Construction mechanics": Candidate's of Technical Sciences thesis. Novosibirsk, 2006, 145 p. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16090854>. (In Russ.)
- [2] Albaut G.N., Kanyshv Yu.I., Tabanyukhova M.V. Photoelastic analysis of the stressed state of beams with cracks. In: *Problems of optimal design of structures: Documents of the 2nd All-Russian conference, Novosibirsk, April 05-06, 2011*. Novosibirsk: Novosibirskii gosudarstvennyi arkhitekturno-stroitel'nyi universitet (Sibstrin), 2011, pp. 28–35. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23254357>. (In Russ.)
- [3] Zerkal S.M., Tabanyukhova M.V. Photoelastic analysis of stress concentration near the vertices of the cracks-cuts. *Innovations in Life*, 2019, no. 2 (29), pp. 126–133. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=40805553>. (In Russ.)
- [4] Tabanyukhova M.V. Investigation of stress-strain state in beams with reinforcing carboplastic layer. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii = Mechanics of composite materials and structures*, 2012, vol. 18, no. 2, pp. 248–254. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17830477>. In Russ.
- [5] Albaut G.N., Baryshnikov V.N., Pangaev V.V., Tabanyukhova M.V., Kharinova N.V. Determination of stress concentration factors in nonstandard problems by polarization-optical methods. *Physical Mesomechanics*, 2003, vol. 6, no. 6, pp. 91–95. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=10424255>. (In Russ.)
- [6] Tabanyukhova M.V., Pangaev V.V. Photoelastic analysis of mode I stress intensity factor in beams with angular notches. *Fracture of Nano and Engineering Materials and Structures – Proceedings of the 16th European Conference of Fracture: 16, Alexandroupolis, July 03–07, 2006*. Alexandroupolis, 2006, pp. 447–448. DOI: http://doi.org/10.1007/1-4020-4972-2_221.
- [7] Albaut G.N., Tabanyukhova M.V., Morozov N.F., Proskura A.V., Yastrebkova N.A. Influence of a round hole on the stress-strain state at the crack tip. *News of higher educational institutions. Construction*, 2000, no. 9 (501), pp. 143–145. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35018209>. (In Russ.)
- [8] Tabanyukhova M.V. Stress reduction in beams in the presence of defects. In: *Defects of buildings and structures. Strengthening of building structures: materials of the XIV scientific and methodological conference of VITU, St. Petersburg, March 18, 2010*. Saint Petersburg: Voennyi inzhenerno-tehnicheskii universitet, 2010, pp. 104–108. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37089066>. (In Russ.)
- [9] Stepanova L.V., Belova O.N., Turkova V.A. Determination of the Williams series expansion's coefficients using digital photoelasticity method and finite element method. *Vestnik Samarskogo universiteta. Estestvennonauchnaia seriia = Vestnik of Samara University. Natural Science Series*, 2019, vol. 25, no. 3, pp. 62–82. DOI: <http://doi.org/10.18287/2541-7525-2019-25-3-62-82>. (In Russ.)

- [10] [10] Stepanova L.V., Frolov K.V. Finite element study of mixed mode loading of the cracked semicircular disc under bending. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2018, no. 3, pp. 128–137. DOI: <http://doi.org/10.15593/perm.mech/2018.3.12>. (In Russ.)
- [11] Albaut G.N., Proskura A.V., Tabanyukhova M.V., Yastebkova N.A. Stress changes at the crack tops due to the presence of round pores in its vicinity. In: *Scientific papers of the II and III International congress "Resource and energy conservation in reconstruction and new construction"*. Novosibirsk: Novosibirskii gosudarstvennyi arkhitekturno-stroitel'nyi universitet (Sibstrin), 2000, pp. 25–30. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25560955>. (In Russ.)
- [12] Albaut G.N., Tabanyukhova M.V. Model determination of pressures concentration in elements of building structures with angle cuttings out. *News of higher educational institutions. Construction*, 2006, no. 10 (574), pp. 107–112. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9311958>. (In Russ.)
- [13] Tabanyukhova M.V. Photoelastic analysis of the stressed state of a flat element with geometric stress concentrators (Cutout and cuts). *Key Engineering Materials*, 2020, vol. 827 KEM, pp. 330–335. DOI: <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.827.330>.
- [14] Alexandrov A. Y., Akhmetzyanov M.H. Polarization-optical methods of mechanics of a deformable body. Moscow: Nauka, 1973, 576 p. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35626697>. (In Russ.)