



DOI: 10.15593/perm.mech/2021.2.04

УДК 539.3

ЗАЛЕЧИВАНИЕ ВНУТРЕННИХ ДЕФЕКТОВ В ПОЛЕ СЖИМАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

В.И. Бухалов, М.Н. Перельмутер, А.Л. Попов

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 28 декабря 2020 г.

Принята: 31 мая 2021 г.

Опубликована: 12 июля 2021 г.

Ключевые слова:

упругий цилиндр, сжимающие напряжения, внутренние дефекты, залечивание, упругость, пластичность, численное решение.

АННОТАЦИЯ

Выполнено численное моделирование процесса залечивания дефектов в поле предельно созданных сжимающих напряжений. В качестве образцов используются изотропные цилиндры с малыми, осесимметрично расположенными дефектами. Полагается, что в бездефектном состоянии цилиндры находились под действием давления, приложенного к боковой поверхности, обеспечивающего исходное поле сжимающих напряжений внутри цилиндра. Дефекты моделируются малой несквозной замкнутой кольцевой полостью, охватывающей ось цилиндра, либо сквозной осесимметричной кольцевой вырезкой из цилиндра. Численная реализация в первом случае выполняется в трехмерной постановке. Для случая дефекта второго типа используется модель плоского напряженного состояния.

Решения рассматриваемых задач выполнялись как в упругой, так и в упругопластической постановке в предположении идеально упругопластического поведения материала. Внешнее давление варьировалось от значений, существенно меньших предела текучести, до предела текучести и в случае внутреннего дефекта – до значений, несколько превышающих его. По результатам численного решения получены зависимости радиальных перемещений поверхностей полости, параллельных оси цилиндра, от величины внешнего давления. Найдены значения давления, при которых наблюдается соприкосновение цилиндрических поверхностей пустотного дефекта. Отмечено, что в случае несквозной полости при любом значении внешнего давления сохранялись незалеченные участки. Проведена оценка эффекта залечивания по объему материала, заполняющего исходную полость при заданной величине исходных сжимающих напряжений. По отношению высоты залеченной (заполненной) области к исходной высоте полости оценивалась величина вновь возникшего контактного давления при заданном уровне сжимающих напряжений в материале.

Оценка эффекта залечивания для сквозной вырезки в цилиндре проводилась по изменению величины зазора, образованного вырезкой между внутренним цилиндром и внешним кольцом в зависимости от приложенного внешнего давления. При полном залечивании зазора определены значения максимального контактного давления в зоне вырезки.

© ПНИПУ

© Бухалов Владислав Игоревич – м.н.с., e-mail: vlad.bukhalov@yandex.ru, ID: 0000-0001-8527-776x.

Перельмутер Михаил Натанович – д.ф.-м.н., в.н.с., e-mail: perelm@ipmnet.ru, ID: 0000-0002-8430-5412.

Попов Александр Леонидович – д.ф.-м.н., проф., в.н.с., e-mail: popov@ipmnet.ru, ID: 0000-0002-4841-5657.

Vladislav I. Bukhalov – Junior Researcher, e-mail: vlad.bukhalov@yandex.ru, ID: 0000-0001-8527-776x.

Mikhaik N. Perelmuter – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher,

e-mail: perelm@ipmnet.ru, ID: 0000-0002-8430-5412.

Aleksandr L. Popov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Leading researcher,

e-mail: popov@ipmnet.ru, ID: 0000-0002-4841-5657.



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)

HEALING OF INTERNAL DEFECTS IN A COMPRESSIVE STRESS FIELD USING THE PLASTIC PROPERTIES OF MATERIALS

V.I. Bukhalov, M.N. Perelmuter, A.L. Popov

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 28 December 2020

Accepted: 31 May 2021

Published: 12 July 2021

Keywords:

elastic cylinder, compressive stress, internal defects, healing, elasticity, plasticity, numerical solution.

ABSTRACT

Numerical simulation of defect healing process in the field of previously created compressive stresses is performed. Isotropic cylinders with small axisymmetrically located defects are used as samples. The pressure created the initial field of compressive stresses inside the cylinder. The defects were modeled as a small blind closed annular cavity or as a through annular cut located around the cylinder axis. In the first case, a numerical three-dimensional solution is considered. For the second defect, the plane stress state model was used.

The problems were solved in both elastic and elastoplastic formulations with an ideally elastoplastic behavior of the material. The external pressure was varied from values significantly lower than the yield strength to the yield strength and (for the first problem) for values slightly exceeding it. Based on the results of the numerical solution, the radial displacements of the cavity sides parallel to the cylinder axis are obtained depending on the external pressure. We found the values of pressure at which the cylindrical surfaces of the void defect were in contact. For the blind cavity, at any external pressure, there were unhealed areas. Healing was assessed by the volume of the material filling the initial cavity at the initial residual stresses. The value of the newly formed contact pressure at a certain value of the compressive stresses was determined by the ratio of the height of the healed area to the cavity height.

The evaluation of the healing effect for a through cut in the cylinder was performed by varying the size of the gap formed by the cut between the inner cylinder and the outer ring depending on the applied external pressure. When the gap is completely healed, the values of the maximal contact pressure in the notch zone are determined.

© PNRPU

Введение

Развитие методик залечивания дефектов позволяет улучшить прочностные и эксплуатационные характеристики материалов и конструкций. Для этой цели используются такие технологические приемы, как отжиг [1], высокоэнергетическое импульсное нагружение электромагнитным полем [2], лазерным излучением [3, 4], воздействием постоянного гидростатического давления [1, 5, 6].

Значительное внимание уделяется возможностям самозалечивания дефектов в материале образца – восстановлению исходного или близкого к нему состояния образца без проведения дополнительных операций. Теоретические основы самозалечивания дефектов типа трещинообразных пустот изложены в [7]. В [8–11] приведены способы самозалечивания с применением капсулированных систем, а в [12] – экспериментальные данные по самозаполнению легирующими элементами пустот, образующихся при высокотемпературной ползучести сплавов под нагрузкой.

В ряде работ, посвященных технологическим аспектам залечивания дефектов, отмечается эффект воздействия сжимающих напряжений, наведенных извне или существовавших в теле до появления пустотных дефектов [1, 3–5, 13–18]. Такие напряжения в поверхностных слоях материала наводятся с помощью виброударного поверхностного упрочнения дробью [17], лазерной ударной обработки [3, 4, 14], пропускания электрического тока, вызывающего локальный разогрев

металла в окрестности вершины трещины, расплавление материала и затекание его под действием окружающих остаточных напряжений внутрь трещины [15], и других технологий. В [16] приведено решение задачи о закрытии сжимающими напряжениями осевой трещины в цилиндрической оболочке, а в [17] подобная задача решается с помощью внешнего давления. В [19, 20] большие сжимающие напряжения используются для создания искусственных плоских трещин из цилиндрических отверстий в образцах, которые затем залечиваются с помощью изотермической [19] и циклической [20] термообработок. К эффекту сжатия можно отнести и самозакрытие трещиноподобных дефектов при снижении растягивающих напряжений, вызвавших раскрытие этих трещин [21, 22]. Однако, несмотря на положительный эффект, отмечается, что при некотором уровне остаточных сжимающих напряжений может наблюдаться повышенная концентрация напряжений [23–25]. В этих условиях перспективным является залечивание дефектов с использованием пластических свойств материала. В [5, 6] представлены результаты такого залечивания для поверхностных дефектов.

Целью данной работы является демонстрация залечивания дефектов в поле сжимающих напряжений при уровне напряжений, достигающих предела пластичности, с возможностью образования нового неразъемного соединения на месте пустотного дефекта. Представлены результаты численного моделирования залечивания внутреннего и сквозного кольцевых дефектов. Расчеты

выполнены методом конечных элементов в программной среде ANSYS Workbench [26] для цилиндра с искусственно созданным несквозным кольцевым дефектом в трехмерной постановке, а также для цилиндра со сквозной кольцевой вырезкой в плоской постановке. На однотипных пустотных дефектах проведены сравнения результатов решений упругих и упругопластических задач.

1. Залечивание внутреннего дефекта в упругопластическом поле сжимающих напряжений

Рассмотрим задачу о залечивании цилиндра с внутренней кольцевой полостью, находящегося под действием внешнего давления P . Схематично сечение цилиндра показано на рис. 1, где R – радиус цилиндра, r – радиус ближайшей к оси цилиндра стороны полости, c – высота цилиндра, d – высота кольцевой полости, f – ширина кольцевой полости, a – ось цилиндра, m и n – вертикальные стороны кольцевой полости, P – внешнее давление.

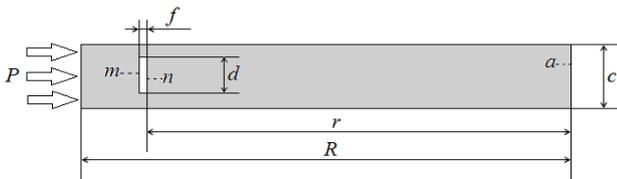


Рис. 1. Сечение цилиндра с кольцевой полостью

Fig. 1. A cylinder cross section with an annular cavity

Материал цилиндра: модуль Юнга $E = 210$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, предел текучести $\sigma_T = 250$ МПа. Для построения трехмерной расчетной модели использован 20-узловой гексаэдрический конечный элемент с параболической аппроксимацией переменных. Средний размер ребра гексаэдрического элемента расчетной

сетки около кольцевой полости составлял $l = 0,001$ мм. Максимальное значение ребра гексаэдрического элемента l для всей модели принималось равным 0,01 мм. Решение задачи получено в упругой и упругопластической постановках при следующих геометрических параметрах модели: $R = 10$ мм, $r = 9$ мм, $c = 1$ мм, $d = 0,2$ мм, $f = 0,01$ мм. Для задачи в упругопластической постановке дополнительно задавалась кривая деформирования с учетом пластических свойств материала. Следует отметить, что задаваемая в ANSYS кривая деформирования является диаграммой одноосного растяжения материала. Переход к пластическому состоянию в расчетной модели находится из условия пластичности Мизеса. Решение нелинейной упругопластической задачи выполняется по итерационной схеме Ньютона – Рафсона [26] с пересчетом матрицы жесткости на каждой итерации.

Оценка степени залечивания дефекта, образованного полостью, получена посредством анализа зависимости радиальных перемещений U_r вертикальных сторон m и n от величины внешнего давления P . На рис. 2 представлены характерные графики зависимостей $U_r(Z, P)$, полученных в результате упругопластического решения задачи (Z – вертикальная координата по высоте полости с началом в ее центре).

Результаты расчета показывают, что увеличение внешнего давления P ведет к сближению сторон m и n кольцевой полости. Видно, что незначительное увеличение давления до предела текучести приводит к кардинальному сближению этих сторон. Максимальное сближение сторон полости наблюдается в ее средней части при $Z = 0$ (рис. 2); здесь же возникает максимальное контактное давление p_c . Высота области полного соприкосновения сторон m и n определялась параметром s (см. рис. 2), а соотношение залеченного объема и объема исходной полости определялось величиной V_r , %. В табл. 1 приведены результаты численного расчета величин h_0 , p_c , s и V_r в зависимости от внешнего давления P для упругопластической постановки задачи.

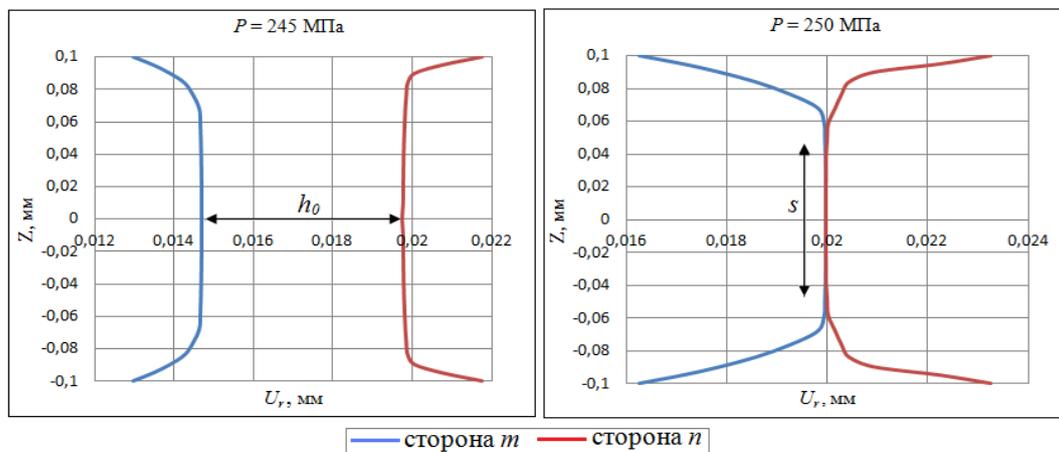


Рис. 2. Изменение радиальных перемещений сторон кольцевой полости по высоте полости при давлении, незначительно меньшем и равном пределу текучести материала цилиндра

Fig. 2. Variation of radial displacements of the annular cavity sides over the cavity height at a pressure slightly lower and equal to the yield point of the cylinder material

Таблица 1

Результаты расчета параметров h_0 , p_c , s и V_r в зависимости от внешнего давления P

Table 1

Computation results of parameters h_0 , p_c , s and V_r depending on the external pressure P

P , МПа	$h_0 \cdot 10^{-3}$, мм	p_c , МПа	s , мм	V_r , %
240	8,186	–	–	17,56
245	5,09	–	–	46,07
247,5	2,498	–	–	67,05
249	0,608	–	–	83,44
250	0	33,07	0,085	88,27
255	0	89,4	0,124	94,16
260	0	127,5	0,137	96,6

На рис. 3 представлены эпюры контактных давлений p_c по высоте заполнения полости для уровней внешнего давления в 250, 255 и 260 МПа, при которых возникали состыкованные участки несквозной полости.

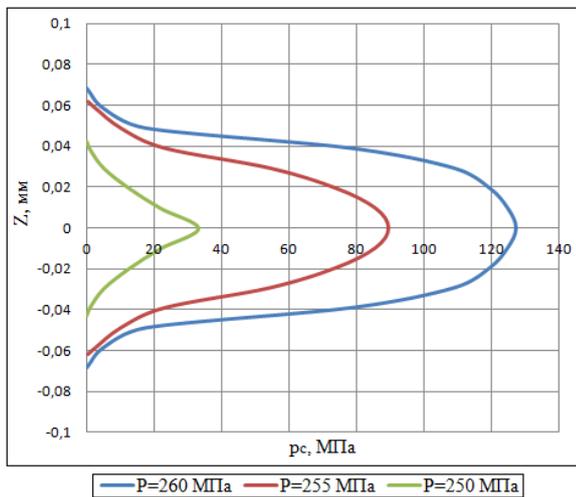


Рис. 3. Эпюры контактного давления по высоте состыкованных участков внутренней полости цилиндра для внешнего давления $P = 250, 255$ и 260 МПа

Fig. 3. Plots of the contact pressure along the height of the docked sections of the inner cavity of the cylinder for external pressure $P = 250, 255$, and 260 MPa

Как видно из табл. 1 и рис. 3, соприкосновение сторон m и n полости возникает при уровне давления $P = 250$ МПа, равном пределу текучести материала. При этом длина области s составляет 42,7 % от высоты полости d , а заполнение полости происходит на 88,3 %. Увеличение давления до $P = 260$ МПа приводит к возрастанию области контакта до 68,8 % от исходной высоты полости, а ее заполнение достигает 96,6 %. При этом в области полного контакта возникают сжимающие напряжения с максимальным значением в 50 % от исходного давления.

Как известно [27], при сдавливании металлов и сплавов пластическая деформация разрушает и удаляет хрупкие поверхности окисных пленок, расширяет

контакт соединяемых поверхностей, т.е. обеспечивает условия, необходимые для образования и развития объемного процесса диффузии, лежащего в основе диффузионной сварки. Основными факторами, способствующими диффузионной сварке, являются давление и температура. Многочисленными опытами установлено, что между этими параметрами существует зависимость, близкая к гиперболической, особенно при малых температурах и больших давлениях. Эта зависимость справедлива при условии приблизительно равной прочности соединений, сваренных при различных температурах нагрева и давлениях. При этом повышенная температура используется для приведения материала в пластическое состояние. Следует также отметить, что по результатам наблюдений [27] при диффузионной сварке одноименных материалов полностью стирается физическая граница раздела между свариваемыми деталями; материал не претерпевает существенного изменения физико-химических свойств.

В описанной выше задаче контактирующие поверхности уже находятся в пластическом состоянии, поэтому повышение температуры выше нормальных условий испытания не требуется. Поскольку сжатие сторон полости происходит в пластическом состоянии при давлении на уровне и выше максимально необходимого для диффузионной сварки (10–40 МПа), то можно полагать, что результатом такого соединения будет монолитный материал, аналогичный тому, который образуется при сварке. Ввиду необратимости пластической деформации при исчезновении причины соединения сторон полости, т.е. остаточного или наведенного напряженного состояния, размыкания соединения в залеченной полости не произойдет.

Отметим также, что при рассмотрении задачи в упругой постановке смыкание сторон кольцевой полости не происходит даже при высоких значениях давления. Так, для $P = 260$ МПа минимальное значение h_0 составило $9,5 \cdot 10^{-3}$ мм; при этом заполнение полости не превысило 8 %.

2. Залечивание сквозной проточки в упругопластическом поле сжимающих напряжений

Следующий пример залечивания сжимающими напряжениями пустотного дефекта рассмотрен на модели цилиндра со сквозной кольцевой вырезкой шириной f , находящегося под действием внешнего давления P . Ввиду наличия сквозной вырезки расчетная модель состоит из внутреннего цилиндра радиуса r и внешнего кольца с наружным радиусом R . Решение задачи получено для плоского напряженного состояния расчетной модели. В силу симметрии задачи рассматриваем 1/4 часть цилиндра (рис. 4); стороны j и i расчетной модели могут перемещаться только в направлении осей X и Y соответственно.

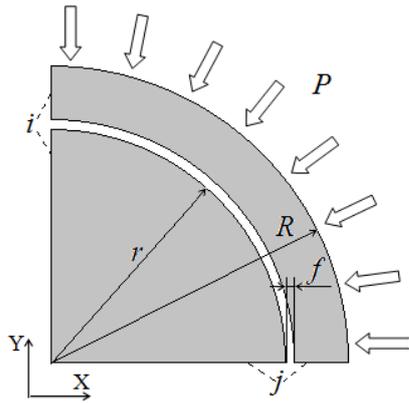


Рис. 4. Модель цилиндра с кольцевой вырезкой

Fig. 4. A cylinder model with a through annular cut

Для дискретизации области использован 8-узловой четырехугольный элемент с параболической аппроксимацией переменных. Средний размер ребра четырехугольного элемента составлял $l = 0,01$ мм. Решение, как и в первом примере, выполнялось в упругой и в упруго-пластической постановках при следующих геометрических параметрах модели: $R = 10$ мм, $r = 9$ мм, $f = 0,01$ мм.

По результатам численного решения установлено, что нулевое расстояние между внутренним цилиндром и внешним кольцом обеспечивается при давлении $P = 25$ МПа, составляющем 10 % от предела текучести материала σ_T . Величина контактного давления p_c в этом случае составляет $\sim 1,7$ % от внешнего давления. При $P = \sigma_T$, контактное давление возрастает в 55 раз, что составляет ~ 90 % от внешнего давления. Зависимости контактного давления p_c от внешнего давления P приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета контактного давления p_c в зависимости от внешнего давления P

Table 2

Computation results for contact pressure p_c depending on external pressure P

P , МПа	Упругое решение	Упругопластическое решение
	p_c , МПа	p_c , МПа
25	4,1	4,13
50	29,12	29,14
100	79,1	80,06
150	129,27	134,9
200	180,5	191,17
250	226,2	227,4

В этой задаче различие результатов решения упругой и упругопластической задач незначительно. Для $P < 100$ МПа расхождение по значениям контактного давления p_c не превышает 1,2 %. При более высоких значениях внешнего давления P максимальное отличие для контактного давления p_c не превышает 6 %. Это

объясняется тем, что в модели сквозного дефекта соединение его поверхностей достигается уже при напряжениях, составляющих малую долю от предела текучести, в то время как контакт сторон несквозного внутреннего пустотного дефекта обеспечивается при напряжениях, равных пределу текучести с учетом пластических свойств материала.

Следует отметить, что в случае залечивания сквозной проточки возникающее напряжение на стыке поверхностей при достижении внешним давлением предела текучести составляет величину, более чем в 6 раз превышающую аналогичный показатель для внутренней полости. Однако оно не приводит к появлению сплошной пластической зоны, облегчающей диффузию металла. В зависимости от степени волнистости и шероховатости стыкуемых поверхностей разреза при их сближении под действием внешнего давления в области контакта могут создаваться металлические связи в масштабе отдельных сминаемых микровыступов, так как давление, распределенное по ним, может превышать предел текучести, а сближение зерен металла на этих поверхностях может доходить до расстояний порядка размера кристаллической решетки [28, 29]. Оценка, выполненная по методике [28], показывает, что даже в случае полированных поверхностей контакта из углеродистой стали общая фактическая площадь физического контакта при давлении порядка предела текучести материала цилиндра не превышает 9 % от площади стыкуемых поверхностей разреза, что не является гарантией от разрыва при снятии внешнего давления. Для достижения сплошного неразрывного контакта поверхностей сквозного разреза требуется намного более высокое внешнее давление, что коррелирует с данными, приведенными в [28, 29].

Закключение

В работе выполнено численное моделирование процесса залечивания пустотных дефектов в форме замкнутых кольцевых полостей в цилиндрическом образце (цилиндр с внутренней несквозной кольцевой полостью и цилиндр со сквозной кольцевой вырезкой) полем сжимающих напряжений, существовавшим до их возникновения.

Для случая несквозной полости получены численные решения трехмерных задач теории упругости и упругопластичности. Показано, что для модели упругой задачи сближение сторон внутренней кольцевой полости незначительно даже при высоких внешних давлениях. Для упругопластической модели соприкосновение (залечивание) сторон такой полости наступает при давлении, равном пределу текучести материала. Исследована величина залеченного объема полости в зависимости от прикладываемого внешнего давления. Показано, что при внешнем давлении, равном и несколько превышающем предел текучести материала цилиндра, в обра-

зовавшейся зоне контакта возникают сжимающие напряжения, достигающие половины приложенного внешнего давления. Такие напряжения в сочетании с доведенным до пластического состояния материалом соединяемых сторон полости позволяют рассчитывать на образование неразъемного соединения, подобного соединению при диффузионной [27] или холодной [28, 29] сварках без дополнительного нагрева внешними источниками тепла, так как механическая активация диффузии реализуется значительно легче, чем температурная [2]. Однако полученный результат не сводится к холодной сварке давлением, ввиду того что соединение сторон полостей происходит при меньших уровнях сжимающих напряжений, чем в случае холодной сварки, так как обе стороны полости к моменту соприкосновения уже находятся в пластическом состоянии. Приведенные качественные соображения по соединению сторон внутренней полости цилиндра требуют экспериментального подтверждения, так как имеющиеся в литературе данные относятся к касанию твердых либо твердой и мягкой поверхностей [30].

Для цилиндра со сквозной кольцевой вырезкой установлено, что полное смыкание внутреннего цилиндра с внешним кольцом наступает уже при давлении в 10 % от предела текучести. При этом, естественно,

Библиографический список

1. Лариков Л.Н. Залечивание дефектов в металлах. – Киев: Наук. думка, 1980. – 280 с.
2. Кукуджанов К.В. О залечивании поврежденности металла высокоэнергетическим импульсным электромагнитным полем // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – № 2. – С. 99–124. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.2.06
3. Influence of pulse sequence and edge material effect on fatigue life of Al2024-T351 specimens treated by laser shock processing / C. Correa, L. Ruiz, M. Díaz, J. Porro, A. García-Beltrán // International Journal of Fatigue. – 2015. – Vol. 70. – P. 196–204. DOI: 10.1108 / IJFI-10-2014-0051
4. Fatigue Life Extension of AA2024 Specimens and Integral Structures by Laser Shock Peening / N. Kashaev, S. Chupakhin, V. Ventzke, M. Horstmann // MATEC Web Conf. – 2018. – Vol. 165, no. 18001. – P. 1–6. DOI: 10.1051/mateconf/201816518001
5. Мацевитый В.М., Вакуленко К.В., Казак И.Б. О залечивании дефектов в металлах при пластической деформации (аналитический обзор) [Электронный ресурс] // Проблемы машиностроения. – 2012. – Т. 15, № 1 – С. 66–76. URL: <http://journals.uran.ua/jme/article/view/52836> (дата обращения: 04.12.2020).
6. Петров А.И., Разуваева М.В. Начальная стадия процесса залечивания пор и трещин в поликристаллических металлах в условиях всестороннего сжатия [Электронный ресурс] // ФТТ. – 2005. – Т. 47, № 5 – С. 880–885. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/3828> (дата обращения: 04.12.2020).
7. Перельмутер М.Н. Моделирование кинетики самозалечивания трещин // Физическая мезомеханика. – 2019. – Т. 22, № 4. – С. 47–55. DOI: 10.24411/1683-805x-2019-14005
8. Оценка перспектив применения самовосстанавливающихся материалов и технологий на их основе / Н.Н. Ситников,

сравнение результатов численного решения для контактного давления по упругой модели показало близость с упругопластической моделью. Создание неразъемного соединения в такой модели возможно при значительном увеличении внешнего давления до величины, при которой контактные поверхности пластически деформируются.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке способа залечивания трещин в ответственных элементах конструкций, таких как трубчатые опоры, трубы газонефтепроводов и др. Для этого в них должно быть создано поле сжимающих напряжений, например, путем посадки с натягом распределённых по длине трубы внешних колец.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант №19-19-00616).

Acknowledgments

This work was supported by the Russian Science Foundation (grant no. 19-19-00616).

- И.А. Хабибуллина, В.И. Машенко, Р.Н. Ризаханов // Перспективные материалы. – 2018. – № 2. – С. 5–16. DOI: 10.30791/1028-978X-2018-2-5-16
9. A review study on encapsulation-based self-healing for cementitious materials / C. Xue, W. Li, J. Li, W.Y. Tam, G. Ye // Structural Concrete. – 2019. – Vol. 20. – P. 198–212. DOI: 10.1002/suco.201800177
10. Design of polymeric capsules for self-healing concrete / B. Hilloulin, K.V. Tittelboom, E. Gruyaert, N. De Belie, A. Loukili // Cement and Concrete Composites. – 2015. – Vol. 55. – P. 298–307. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2014.09.022
11. Blaiszik B.J., Sottos N.R., White S.R. Nanocapsules for self-healing materials // Composites Science and Technology. – 2008. – Vol. 68. – P. 978–986. DOI: 10.1016/j.compscitech.2007.07.021
12. Self healing of creep damage in iron-based alloys by supersaturated tungsten / H. Fang [et al.] // Acta Materialia. – 2019. – Vol. 166. – P. 531–542. DOI: 10.1016/j.actamat.2019.01.014
13. Experimental and numerical investigation of residual stresses in laser shock peened AA2198 / S. Keller, S. Chupakhin, P. Staron, E. Maawad // Journal of materials Processing Technology – 2018. – Vol. 255. – P. 294–307. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.11.023
14. The effect of material cyclic deformation properties on residual stress generation by laser shock processing / I. Angulo, F. Cordovilla, A. Garcia-Beltran, N. Smyth // Int. J. of Mech. Sci. – 2019. – Vol. 156. – P. 370–381. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2019.03.029
15. Self-healing of damage inside metals triggered by electropulsing stimuli / H. Song, Z. Wang, X. He, J. Duan // Scientific Reports. – 2017. – Vol. 7(1). – No. 7097. – P. 1–11. DOI: 10.1038/s41598-017-06635-9
16. Crack closure effects in a cracked cylinder under pressure / J. Zhao, R. Liu, T. Zhang, X. Wu // Fracture of Nano and

Engineering Materials and structures. – 2006. – P. 259–260. DOI: 10.1007/1-4020-4972-2_127

17. Growth retardation and healing of cylindrical shell wall cracks under external pressure with different profiles / D. Vaisburd, E. Evdokimov, O. Porutchikova, M. Chebodaev // Russian Physics Journal. – 2005. – Vol. 48, no. 8. – P. 886–888. DOI: 10.1007/s11182-005-0217

18. Метод реконструкции остаточных напряжений и пластических деформаций в тонкостенных трубопроводах в состоянии поставки и после двухстороннего виброударного поверхностного упрочнения дробью / В.П. Радченко, В.Ф. Павлов, Т.И. Бербасова, М.Н. Саушкин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2020. – № 2. – С. 123–133. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.2.10

19. Xin R., Ma Q., Li W. Microstructure and mechanical properties of internal crack healing in a low carbon steel // Materials Science & Engineering. – 2016. – Vol. A 662. – P. 65–71. DOI: 10.1016/j.msea.2016.03.045

20. A novel crack healing technique in a low carbon steel by cyclic phase transformation heat treatment: The process and mechanism / M. He, Z. Zhentai, F. Shi, D. Guo, J. Yu // Materials Science & Engineering. – 2020. – Vol. A 772, no. 138712. – P. 1–7. DOI: 10.1016/j.msea.2019.138712

21. Плужникова Т.Н., Федоров В.А. Самопроизвольное и искусственное залечивание микротрещин в ионных кристаллах [Электронный ресурс] // Вестник ТГУ. – 2009. – Т. 14, № 1. – С. 213–219. – URL: <http://journals.tsutmb.ru/go/1810-0198/2009/1/213-219/> (дата обращения: 04.12.2020).

References

1. Larikov L.N. Zalechivanie defektov v metallakh [Healing defects in metals]. Kiev, Nauk. dumka, 1980, 280 p.

2. Kukudzhyanov K.V. On healing metal damages using high-energy pulsed electromagnetic field. PNRPU Mechanics Bulletin, 2017, no. 2, pp. 99-124. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.2.06

3. Correa C., Ruiz L., Díaz M., Porro J., García-Beltrán A. Influence of pulse sequence and edge material effect on fatigue life of Al2024-T351 specimens treated by laser shock processing. International Journal of Fatigue, 2015, vol. 70, pp. 196-204. DOI: 10.1108 / IJFI-10-2014-0051

4. Kashaev N., Chupakhin S., Ventzke V., Horstmann M. Fatigue Life Extension of AA2024 Specimens and Integral Structures by Laser Shock Peening. MATEC Web Conf. 2018, vol. 165, no. 18001, pp. 1-6. DOI: 10.1051 / mateconf / 201816518001

5. Matsevityi V.M., Vakulenko K.V., Kazak I.B. O zalechivani defektov v metallah pri plasticheskoy deformacii (analiticheskij obzor) [About healing of defects in metals during plastic deformation (analytical review)]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, vol. 15, no. 1, pp. 66-76, available at: <http://journals.urau.ru/jme/article/view/52836>

6. Petrov A.I., Razuvaeva M.V. Initial stage of void and crack healing in polycrystalline metals under uniform compression. Physics of the Solid State, 2005, vol. 47, no. 5, pp. 880-885, available at: <https://journals.ioffe.ru/articles/3828>

7. Perelmuter M.N. Modelirovanie kinetiki samozalechivaniya treshchin [Modeling the kinetics of fracture self-healing]. Fizicheskaya mezomekhanika, 2019, vol. 22, no. 4, pp. 47-55. DOI: 10.24411/1683-805x-2019-14005

8. Sitnikov N.N., Habibullina I.A., Mashchenko V.I., Rizahanov R.N. Ocenka perspektiv primeneniya samovosstanavlivayushchih materialov i tekhnologij na ih osnove [Prospects of

22. Superior relaxation of stresses and self-healing behavior of epoxy-amine coatings / M. Villani [et al.] // RSC Adv. – 2016. – Vol. 6. – P. 245–259. DOI: 10.1039/C5RA21147F

23. Савин Г.Н., Тульчий В.Н. Справочник по концентрации напряжений. – Киев: Вища школа, 1976. – 410 с.

24. Семенов-Ежов И.Е., Ширшов А.А. Концентрация напряжений в толстостенных цилиндрических оболочках и корпусных деталях при действии давления [Электронный ресурс] // Инженерный вестник. – 2015. – № 5. – С. 1–9. – URL: <http://ainjournal.ru/doc/765754.html> (дата обращения: 04.12.2020).

25. Буланов В.Б., Семенов-Ежов И.Е., Ширшов А.А. Концентрация напряжений в трубе с внутренними выступами // Справочник. Инженерный журнал. – 2015. – № 1. – С. 49–51. DOI: 10.14489/hb.2015.01.pp.049-051

26. ANSYS Mechanical APDL Structural Analysis Guide // ANSYS, Inc. Southpointe 275 Technology Drive. Canonsburg, Release 15. – 2013. – 522 p. – URL: <https://www.pdfdrive.com/ansys-mechanical-apdl-structural-analysis-guidepdf12262220.html> (дата обращения: 04.12.2020).

27. Казаков Н.Ф. Диффузионная сварка материалов. – М.: Машиностроение. – 1976. – 312 с.

28. Кочергин К.А. Сварка давлением. – Л.: Машиностроение, 1972. – 216 с.

29. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1986. – 689 с.

30. Дёмкин Н.Б. Фактическая площадь касания твёрдых поверхностей. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 112 с.

application of self-healing materials and technologies based on them]. Perspektivnye materialy, 2018, no. 2, pp. 5-16. DOI: 10.30791/1028-978X-2018-2-5-16

9. Xue C., Li W., Li J., Tam VWY., Ye G. A review study on encapsulation-based self-healing for cementitious materials. Structural Concrete, 2019, vol. 20, pp. 198-212. DOI: 10.1002/suco.201800177

10. Hilloulin B., Tittelboom K.V., Gruyaert E., De Belie N., Loukili A., Design of polymeric capsules for self-healing concrete. Cement and Concrete Composites, 2015, vol. 55, pp. 298-307. DOI: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2014.09.022

11. B.J. Blaiszik, N.R. Sottos, S.R. White, Nanocapsules for self-healing materials. Composites Science and Technology, 2008, vol. 68, pp. 978–986. DOI: 10.1016/j.compscitech.2007.07.021

12. Fang H. et al. Self healing of creep damage in iron-based alloys by supersaturated tungsten. Acta Materialia, 2019, vol. 166, pp. 531-542. DOI: 10.1016/j.actamat.2019.01.014

13. Keller S., Chupakhin S., Staron P., Maawad E. Experimental and numerical investigation of residual stresses in laser shock peened AA2198. Journal of materials Processing Technology, 2018, vol. 255, pp. 294-307. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.11.023

14. Angulo I., Cordovilla F., Garcia-Beltran A., Smyth N. The effect of material cyclic deformation properties on residual stress generation by laser shock processing. Int. J. of Mech. Sci. 2019, Vol. 156, pp. 370-381. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2019.03.029

15. Song H., Wang Z., He X., Duan J. Self-healing of damage inside metals triggered by electropulsing stimuli. Scientific Reports, 2017, vol. 7(1), no. 7097, pp. 1-11 doi:10.1038/s41598-017-06635-9

16. Zhao J., Liu R., Zhang T., Wu X. Crack closure effects in a cracked cylinder under pressure. Fracture of Nano and Engi-

neering *Materials and structures*, 2006, pp. 259-260. doi: 10.1007/1-4020-4972-2_127

17. Vaisburd D., Evdokimov E., Porutchikova O., Cherbodaev M. Growth retardation and healing of cylindrical shell wall cracks under external pressure with different profiles. *Russian Physics Journal*, 2005, vol. 48, no. 8, pp. 886-888. DOI: 10.1007/s11182-005-0217

18. Radchenko V.P., Pavlov V.Ph., Berbasova T.I., Saushkin M.N. Metod rekonstruktsii ostatochnykh napriazhenii i plasticheskikh deformatsii v tonkostennykh truboprovodakh v sostoianii postavki i posle dvukhstoronnogo vibroudarnogo poverkhnostnogo uprochneniia drobiu [The method of reconstruction of residual stresses and plastic deformations in thin-walled pipelines in the delivery state and after bilateral vibro-shock surface hardening with a shot]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2020, no. 2, pp. 123-133. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.2.10

19. Xin R., Ma Q., Li W. Microstructure and mechanical properties of internal crack healing in a low carbon steel. *Materials Science & Engineering*, 2016, vol. A 662, pp. 65-71. DOI: 10.1016/j.msea.2016.03.045

20. He M., Zhentai Z., Shi F., Guo D., Yu J. A novel crack healing technique in a low carbon steel by cyclic phase transformation heat treatment: The process and mechanism. *Materials Science & Engineering*, 2020, vol. A 772, no. 138712, pp. 1-7 DOI: 10.1016/j.msea.2019.138712

21. Plushnikova T.N., Fedorov V.A. Samoproizvol'noe i iskusstvennoe zalechivanie mikrotreshchin v ionnykh kristallakh [Spontaneous and artificial crack healing in alkali-halide crystals]. *Tambov University Reports*, 2009, vol.14, no. 1, pp. 213-219, available at: <http://journals.tsutmb.ru/go/1810-0198/2009/1/213-219/>

22. Villani M. et al. Superior relaxation of stresses and self-healing behavior of epoxy-amine coatings. *RSC Adv.* 2016, vol. 6, pp. 245-259. doi: 10.1039/C5RA21147F

23. Savin G.N., Tulchii V.I. Spravochnik po koncentracii napryazhenij [Reference-book on stress concentration]. *Kiev, Vishcha shkola*, 1976, 410 p.

24. Semenov-Ezhov I.E., Shirshov A.A. Koncentraciya napryazhenij v tolstostennykh cilindricheskikh obolochkakh i korpusnykh detal'yah pri dejstvii davleniya [Stress concentration in thick-walled cylindrical shells and body parts under pressure]. *Engineering Bulletin*, 2015, no. 5, pp. 1-9, available at: <http://ainjournal.ru/doc/765754.html>

25. Bulanov V. B., Semenov-Ezhov I. E., Shirshov A. A. Stress concentration in a thick-walled tube with shallow interior recess. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal*, 2015, no. 1, pp. 49-51. DOI: 10.14489/hb.2015.01.pp.049-051

26. ANSYS Mechanical APDL Structural Analysis Guide. ANSYS, Inc. Southpointe 275 Technology Drive. Canonsburg, Release 15, 2013, 522 p., available at: <https://www.pdfdrive.com/ansys-mechanical-apdl-structural-analysis-guidepdf-e12262220.html>

27. Kazakov N.F. Diffuzionnaia svarka materialov [Diffusion welding of materials]. Moscow, Mashinostroenie, 1976, 312 p.

28. Kochergin K.A. Svarka davleniem [Pressure welding]. *L.: Mashinostroenie*, 1972, 216 p.

29. Kolmogorov V.L. Mekhanika obrabotki metallov davleniem [Mechanics of metal forming]. Moscow, Metallurgiya, 689 p.

30. Demkin N.B. Fakticheskaia ploshchad' kasaniia tverdykh poverkhnostei [Actual contact area of hard surfaces]. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1962, 112 p.