



Механика деформируемого твёрдого тела

УДК 539.376:539.4.014.13

Влияние размеров области поверхностного упрочнения на напряженно-деформированное состояние балки с надрезом полукруглого профиля

© В. П. Радченко, Д. М. Шишкин

Самарский государственный технический университет,
Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

Аннотация

Исследуется влияние размеров области поверхностного пластического упрочнения на напряженно-деформированное состояние балки с надрезом полукруглого профиля. Задача сведена к краевой задаче фиктивной термоупругости, при этом начальные (пластические) деформации моделируются температурными анизотропными деформациями в неоднородном температурном поле. Решение реализовано на основе метода конечных элементов.

Для модельных расчетов в качестве исходной информации использовались экспериментальные данные о распределении остаточных напряжений в гладкой балке из сплава ЭП742 после ультразвукового механического упрочнения. Выполнен вариативный численный анализ влияния радиуса надреза и величины зоны упрочнения грани балки на распределение компонент тензора остаточных напряжений в наименьшем сечении от дна концентратора.

Показано, что при величине зоны упрочнения более 16–20 % от площади всей грани напряженно-деформированное состояние в наименьшем сечении практически стабилизируется. Установлено, что если радиус полукруглого надреза меньше толщины упрочненного слоя (области сжатия материала), то происходит увеличение (по модулю) нормальной продольной компоненты тензора остаточных напряжений, а если радиус

Научная статья

 Контент публикуется на условиях лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

Образец для цитирования

Радченко В. П., Шишкин Д. М. Влияние размеров области поверхностного упрочнения на напряженно-деформированное состояние балки с надрезом полукруглого профиля // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2020. Т. 24, № 4. С. 663–676. <https://doi.org/10.14498/vsgtu1828>.

Сведения об авторах

Владимир Павлович Радченко  <https://orcid.org/0000-0003-4168-9660>

доктор физико-математических наук, профессор; заведующий кафедрой; каф. прикладной математики и информатики; e-mail: radchenko.vp@samgtu.ru

Дмитрий Михайлович Шишкин  <https://orcid.org/0000-0003-3205-2262>

аспирант; каф. прикладной математики и информатики; e-mail: shishkin.dim@yandex.ru

надреза больше толщины упрочненного слоя, то наблюдается уменьшение (по модулю) этой величины по сравнению с аналогичной компонентой для гладкой упрочненной балки для всех величин зоны упрочнения более 16–20 % от площади всей грани балки.

Выполнена экспериментальная проверка разработанного численного метода на основе метода конечных элементов для балки с полностью упрочненной гранью.

Ключевые слова: опережающее поверхностное пластическое упрочнение, область упрочнения, полукруглый надрез, балка, сплав ЭП742, остаточные напряжения.

Получение: 25 сентября 2020 г. / Исправление: 11 ноября 2020 г. /

Принятие: 16 ноября 2020 г. / Публикация онлайн: 25 декабря 2020 г.

Введение. В процессе эксплуатации любое изделие в той или иной мере подвергается влиянию термических, химико-термических, механических воздействий, что приводит к его износу, накоплению поврежденности в материале и провоцирует другие деградационные процессы в деталях и узлах элементов конструкций. Одним из эффективных способов повышения ресурса металлоконструкций является поверхностное пластическое упрочнение (ППД), широко распространенное в штатных технологиях в авиадвигателестроении, энергетическом машиностроении и других отраслях промышленности. Положительное влияние ППД на характеристики надежности связывают с образованием полей остаточных напряжений (ОН) в приповерхностном слое изделий после применения технологии упрочнения [1–12]. Наибольшая эффективность применения ППД наблюдается для деталей с концентраторами напряжений в виде вырезов, вмятин, царапин и иных трещиноподобных несплошностей [7,9,12–18]. Такое явление однозначно обуславливается наличием сжимающих напряжений вблизи концентратора, которые локально снижают интенсивность эксплуатационных растягивающих напряжений, предотвращают растрескивание металла и раскрытие берегов трещин нормального отрыва. Уменьшение дислокаций в слоях материала посредством наружного уплотнения способствует также изменению траектории процесса разрушения. В подтверждение этого в работах [16, 17] на примере развития поверхностных трещин в образцах, изготовленных из никелевого суперсплава и ослабленных царапинами и вмятинами, представлены результаты положительного влияния ОН на усталостную долговечность. Результаты работы [15], полученные на основе линейной механики разрушения при исследовании цилиндрического стального образца с надрезом, также показали, что остановка роста трещины усталости наблюдается в поверхностном упрочненном слое по причине резкого падения значений расчетного коэффициента интенсивности напряжений.

В прикладных технологических задачах выбор методов и режимов поверхностного упрочнения проводится, как правило, без учета формы, размеров концентратора и вариантов упрочнения поверхностного слоя детали. При наличии в детали мелких надрезов, обусловленных конструктивными особенностями, например, для подачи смазывающих жидкостей, сопряжения деталей и т. д., подавляющее число технологий для упрочнения поверхности

концентратора напряжений неприменимо вследствие недоступности упрочняющего инструмента к поверхности концентратора из-за более крупных габаритов по сравнению с геометрией соответствующих впадин. Поэтому в этом случае используют технологии опережающего поверхностного пластического деформирования (ОППД), когда первоначально упрочняется гладкая деталь, а затем наносится соответствующий концентратор напряжений. В результате удаления части упрочненного материала приповерхностного слоя происходит перераспределение напряжений и в области концентратора формируется локальное поле остаточных напряжений, с которым связывают, например, существенное увеличение предела выносливости в условиях многоциклового нагружения упрочненных деталей по сравнению с неупрочненными [12, 19–21], обусловленное торможением нераспространяющейся трещины усталости в области сжатия упрочненного материала [12, 19, 22]. При ОППД при нанесении единичного концентратора возникает вопрос об оптимальной величине области упрочнения гладкой детали для создания максимальных значений сжимающих ОН, поскольку упрочнение всей поверхности гладкой детали нецелесообразно в силу трудоемкости некоторых технологий упрочнения (обработка роликом, алмазное выглаживание и другие). Разрешение этого вопроса на примере упрочненной балки с полукруглым сквозным надрезом различного радиуса и является целью данной работы.

1. Постановка задачи. Рассматривается балка $100 \times 10 \times 10$ мм, часть одной из граней упрочнена одним из методов ППД, а затем в соответствии с технологией ОППД в середине упрочненной части поверхности наносится полукруглый надрез радиуса ρ (см. рис. 1), вследствие чего происходит перераспределение остаточных напряжений, образованных после упрочнения части гладкой поверхности (залита цветом на рис. 1). Задача состоит в исследовании напряженно-деформированного состояния по глубине слоя от дна концентратора в зависимости от радиуса ρ и величины зоны упрочнения $2k$, при этом основной проблемой является определение оптимального значения величины k , увеличение которой практически уже не влияет на напряженно-деформированное состояние в области концентратора. Отметим, что распределение ОН в этом сечении играет ключевую роль в критериальных зависимостях для оценки предела выносливости при многоцикловом нагружении [12, 18–20].

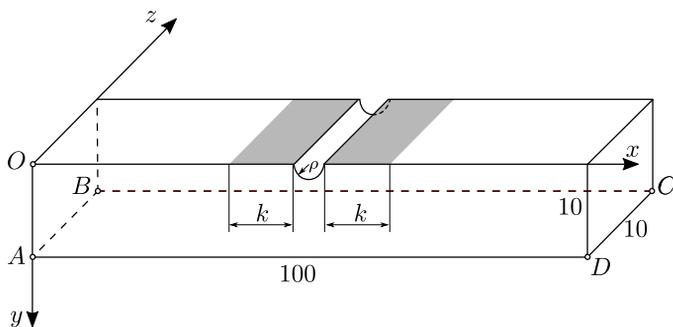


Рис. 1. Схематическое изображение упрочненной балки с концентратором напряжений
[Figure 1. Schematic representation of a reinforced beam with a stress concentrator]

2. Реконструкция напряженно-деформированного состояния в гладкой балке с полностью упрочненной гранью. Рассмотрим сначала случай, когда упрочнена вся верхняя грань гладкой балки без надреза, изображенной на рис. 1. Введем декартову систему координат $Oxyz$, в которой плоскость xOz совмещена с упрочненной гранью, а ось Oy направлена по глубине слоя (рис. 1). В дальнейшем в модельных расчетах в качестве исходной информации используются экспериментальные данные для гладкой балки из сплава ЭП742 указанных на рис. 1 размеров после ультразвукового (механического) упрочнения одной из граней [23]. Для этой технологии упрочнения все компоненты тензоров ОН и пластических деформаций (ПД) зависят лишь от компоненты y , при этом недиагональные компоненты этих тензоров равны нулю [23, 24]. Обозначим через $\sigma_i = \sigma_i(y)$, $q_i = q_i(y)$ ($i = x, y, z$) диагональные компоненты тензоров ОН и ПД соответственно, при этом для гладкой балки $\sigma_x(y) = \sigma_z(y)$, а $\sigma_y(y) = 0$ [23, 24]. Задача реконструкции полей ОН и ПД в этом случае решена (см. [23, 24]) и основные расчетные зависимости имеют вид

$$\sigma_x = \sigma_z, \quad q_x = q_z = -\frac{1 - \nu}{E} \sigma_x, \quad q_y = \frac{2(1 - \nu)}{E} \sigma_x, \quad (1)$$

где E и ν — модуль Юнга и коэффициент Пуассона соответственно. Из соотношений (1) следует, что достаточно знать лишь экспериментальную зависимость для компоненты $\sigma_x = \sigma_x(y)$, а остальные компоненты тензоров ОН и ПД определяются из (1). Экспериментальные данные для $\sigma_x = \sigma_x(y)$ в [23] приведены лишь для тонкого приповерхностного слоя глубиной около 200 мкм и представлены маркерами на рис. 2. Поэтому для использования (1) необходимо построить аналитическую аппроксимацию для этой компоненты и экстраполировать ее на все значения $0 \leq y \leq H$ ($H = 10$ мм — толщина балки) при выполнении условия самоуравновешенности

$$\int_0^H \sigma_x(y) dy = 0.$$

Для этого использовалась аппроксимация вида

$$\sigma_x(y) = \sigma_0 - \sigma_1 \exp\left[-\left(\frac{y - y^*}{b}\right)^2\right], \quad (2)$$

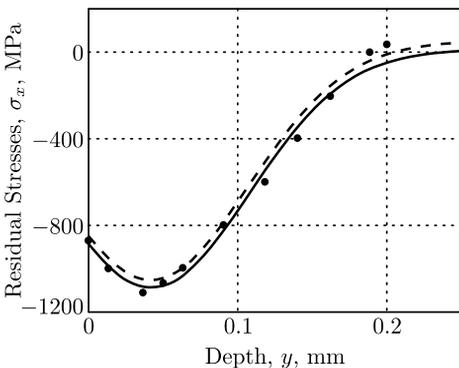


Рис. 2. Данные для компоненты $\sigma_x = \sigma_x(y)$ после упрочнения УЗУ поверхности балки из сплава ЭП742: экспериментальные (маркеры), расчетные (сплошная линия) по аппроксимации (2) и расчетные (штриховая линия) для термоупругой задачи

[Figure. 2. Data for the component $\sigma_x = \sigma_x(y)$ after ultrasonic hardening of the surface of a beam made of EP742 alloy: experimental (markers), calculated (solid line) by approximation (2) and designed (dashed line) for the thermoelastic problem]

где σ_0 , σ_1 , b — параметры, методика идентификации которых приведена в [23], а $y^* = 0.034$ мм — координата локального минимума экспериментальной эпюры (см. рис. 2). Значения параметров аппроксимации (2) следующие: $\sigma_0 = 13.38$ МПа, $\sigma_1 = 1100.98$ МПа, $b = 0.0928$ мм. Расчетные значения для зависимости (2) представлены на рис. 2 сплошной линией.

3. Методика реконструкции остаточных напряжений в балке с полукруглым надрезом после ОППД. Методика реконструкции ОН в области надреза после ОППД базируется на методе расчета по первоначальным деформациям, основы которого заложены в работе [1], где на качественном уровне при априорно заданных законах распределения пластических деформаций в приповерхностных слоях решены задачи распределения остаточных напряжений для простейших поверхностно упрочненных элементов конструкций.

Этот подход широко используется и в современных исследованиях в связи с возросшим спектром возможностей вычислительной техники и программного обеспечения [13, 14, 20, 24–27]. В основном используют изотропный характер задания первоначальных деформаций с фиксированным уровнем их величины по глубине упрочненного слоя. Так, в [20] с применением численного метода на основе МКЭ детально исследовано распределение напряжений в поверхностно упрочненном слое для цилиндрических и плоских деталей (гладких и с концентраторами напряжений) при моделировании равномерного упрочнения всей поверхности детали с учетом концентратора, равномерного упрочнения всей поверхности детали без упрочнения концентратора (впадины), равномерного упрочнения криволинейной части впадины концентратора без упрочнения поверхности детали. Получены на качественном уровне зависимости распределения остаточных напряжений по глубине слоя в зависимости от технологии упрочнения, геометрических параметров детали и концентратора, глубины залегания первоначальных пластических деформаций, что позволило провести сравнительный анализ эффективности схем упрочнения. В работах [13, 14, 24, 26, 27] использовались уже реальные экспериментальные эпюры распределения некоторых компонент тензора остаточных напряжений и на основе этой информации разработаны методы реконструкции напряженно-деформированного состояния после процедуры упрочнения, при этом краевая задача сводилась к решению фиктивной задачи термоупругости в неоднородном (по глубине слоя) температурном поле с учетом аналогии между температурными и остаточными пластическими деформациями.

Рассмотрим схему решения задачи для балки из сплава ЭП742.

1. На первом этапе определяются поля ОН и ПД в гладкой балке по методике, изложенной в п. 2, с использованием соотношений (1) и (2).
2. На втором этапе определенные по (1), (2) компоненты тензора остаточных ПД $q_i = q_i(y)$ ($i = x, y, z$) моделировались температурными деформациями с использованием соотношений

$$q_i(y) = \beta_i(T(y))[T(y) - T_0] \quad (i = x, y, z; 0 \leq y \leq H), \quad (3)$$

где T_0 — некоторое фиксированное значение температуры на грани балки, противоположной упрочненной грани (см. рис. 1), $\beta_i(T(y))$ — коэффициенты температурного расширения, $T = T(y)$ — заданное температурное поле по координате y , при этом закон изменения температуры

может быть любым [24, 27]. Суть метода состоит в том, что известные остаточные пластические деформации (формулы (1)) приравняются к температурным деформациям (правая часть (3)). Для этого при заданных $q_i(y)$ и $T = T(y)$ по формуле (3) рассчитываются коэффициенты температурного расширения $\beta_i = \beta_i(T(y))$, которые и являются исходными данными для решения задачи термоупругости (например, в пакете ANSYS).

3. На третьем этапе на упрочненный гладкий образец наносится полукруглый надрез (см. рис. 1), т. е. удаляется часть материала с наведенными ОН и ПД. В результате в объеме балки с концентратором образуется неуравновешенное поле полных деформаций, которое трансформируется за счет перераспределения упругих деформаций, и балка с надрезом приходит в равновесное состояние. На этом этапе строится геометрическая конечно-элементная модель балки с надрезом с заданными по формуле (3) псевдотемпературными начальными деформациями (точнее, задаются $T = T(y)$ и $\beta_i = \beta_i(T(y))$ по оставшемуся после нанесения надреза объему из решения для гладкой балки).
4. На четвертом этапе стандартными методами на основе МКЭ решается фиктивная задача термоупругости относительно напряжений — начальные (псевдотемпературные) деформации фактически задаются через (3).

4. Результаты расчетов и их анализ. Численное исследование выполнено для значений радиуса надреза $\rho = \{0.1; 0.3; 0.5\}$ мм и различных значений величины зоны упрочнения $k = \{1; 2; 4; 6; 8; 10\}$ мм (см. рис. 1). Рассматривался также случай упрочнения всей грани при всех трех значениях ρ , что соответствует $k = \{49.9; 49.7; 49.5\}$ мм. Распределение температуры $T = T(y)$ в гладкой балке задавалось в соответствии с решением стационарной задачи теплопроводности, в которой на упрочненной поверхности задавалась температура $T_1 = 400^\circ\text{C}$, на противоположной ей грани — $T_0 = 20^\circ\text{C}$, а боковые грани теплоизолированы, т. е. рассматривалось решение задачи теплопроводности с граничными условиями первого рода. В расчетах использовались справочные значения коэффициента температуропроводности для сплава ЭП742 в зависимости от температуры (приведены в [27]). В случае упрочнения части поверхности балки (заштрихована на рис. 1) температура $T = T_1$ задавалась лишь на ней, $T = T_0$ — на противоположной грани и распределение температуры $T = T(y)$ в соответствии с (3) задавалось лишь в области под упрочненной частью балки, а в оставшейся части (вне области под упрочненной гранью) в начальный момент времени $T = T_0$.

Одной из особенностей решения этой задачи является учет условия пластической несжимаемости материала $q_x + q_y + q_z = 0$, используемого при реконструкции полей ОН. Для этого в краевой задаче термоупругости в качестве коэффициента Пуассона использована величина $\nu = 0.499$.

Геометрическое конечно-элементное моделирование с последующим численным решением реализовано в программном пакете ANSYS. Детали этой части работы аналогичны описанным в публикации [24].

Для сравнительного анализа результатов численного расчета на основе МКЭ с экспериментальными данными и данными по модели (1) рассмотрена бездефектная геометрическая модель (гладкая упрочненная балка). В каче-

стве иллюстрации на рис. 2 штриховой линией показаны результаты расчетов для остаточного напряжения $\sigma_x = \sigma_x(y)$ в упрочненном слое на основе МКЭ, из анализа которых следует их хорошая коррелированность как с экспериментальными данными, так и с результатами расчетов по аппроксимации (2). Наблюдается также практически полное совпадение графиков для остаточных ПД по модели (1) с соответствующими графиками, полученными решением задачи термоупругости на основе МКЭ. При численном решении задач для гладкой балки и балки с концентратором использовались следующие граничные условия: ребро AB закреплялось жестко, а на ребре DC реализовано шарнирное опирание с возможностью перемещений лишь вдоль оси Ox (см. рис. 1). Центр полукруглого надреза находится на расстоянии $x = 50$ мм.

Приведем и проанализируем результаты расчетов для ОН в балках с концентраторами при различных величинах зон упрочнения, полученных в результате численного решения задач на основе метода конечных элементов.

Наибольший интерес представляет распределение напряжений по глубине слоя в сечении от дна концентратора, т. е. в наименьшем сечении детали, поскольку интегральная величина $\sigma_x = \sigma_x(h)$ (h — глубина слоя от дна концентратора) входит в критериальные зависимости для оценки повышения предела выносливости упрочненных деталей по отношению к неупрочненным в условиях многоциклового нагружения [12, 18–20]. В дальнейшем все графики распределения компонент тензора остаточных напряжений приведены именно для этого сечения.

Для бездефектной балки величина h соответствует глубине упрочненного слоя от верхней грани. На рис. 3, а приведены графики зависимости для напряжения $\sigma_x = \sigma_x(h)$ для бездефектной балки в сечении при $x = 50$ мм в зависимости от величины зоны упрочнения при $k = 2$ мм, $k = 6$ мм и $k = 50$ мм (здесь упрочнена вся грань).

Из анализа результатов расчетов и представленных графиков следует, что в бездефектной балке распределение ОН в среднем сечении ($x = 50$ мм) при $k \geq 8$ мм практически не изменяется и близко к НДС гладкой балки с полностью упрочненной гранью. На рис. 3 (b, c, d) приведены графики распределения нормальных компонент тензора ОН при радиусе надреза $\rho = 0.1$ мм. Здесь надрез находится в зоне упрочнения материала (в области его сжатия).

Отметим некоторые особенности полученных результатов.

Первая особенность состоит в появлении компоненты $\sigma_y = \sigma_y(h)$, которая в гладкой балке была нулевой.

Вторая особенность заключается в том, что при упрочнении всей грани компонента $\sigma_x = \sigma_x(y)$ в концентраторе выше, чем у гладкой балки.

Третья особенность связана с тем, что компоненты $\sigma_x = \sigma_x(y)$ и $\sigma_z = \sigma_z(y)$ различаются, в гладкой балке они совпадают.

Из анализа данных расчетов и графиков вновь можно констатировать, что распределение ОН при $k \geq 8$ мм практически стабилизируется и близко к случаю упрочнения всей грани. Этот же результат следует и для надрезов $\rho = 0.3$ мм и $\rho = 0.5$ мм (см. рис. 4), но в этом случае величина сжимающих напряжений $\sigma_x = \sigma_x(h)$ (и остальных компонент тензора ОН) существенно меньше, чем при упрочнении всей грани балки. Это связано с тем, что глубина надреза велика по сравнению с упрочненным слоем (см. рис. 2).

Выполненные исследования показывают, что при применении технологии

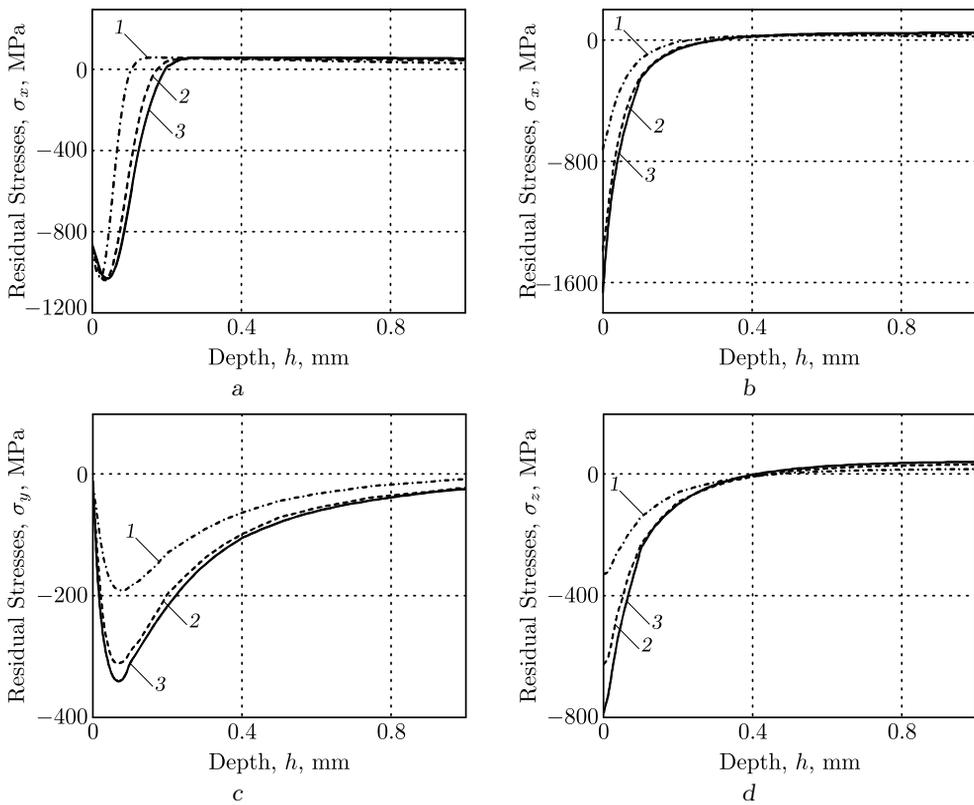


Рис. 3. Распределение остаточных напряжений в гладкой бездефектной балке (а) и в наименьшем сечении балки с концентратором $\rho = 0.1$ мм (b, c, d) при различных величинах области упрочнения. Цифры: 1 – $k = 2$ мм; 2 – $k = 6$ мм; 3 – $k = 50$ мм (а), $k = 49.9$ мм (b, c, d)

[Figure 3. Distribution of residual stresses in a smooth defect-free beam (a) and in the smallest section of a beam with a concentrator of $\rho = 0.1$ mm (b, c, d) at various values of the hardening region. Labels: 1 – $k = 2$ mm; 2 – $k = 6$ mm; 3 – $k = 50$ mm (a), $k = 49.9$ mm (b, c, d)]

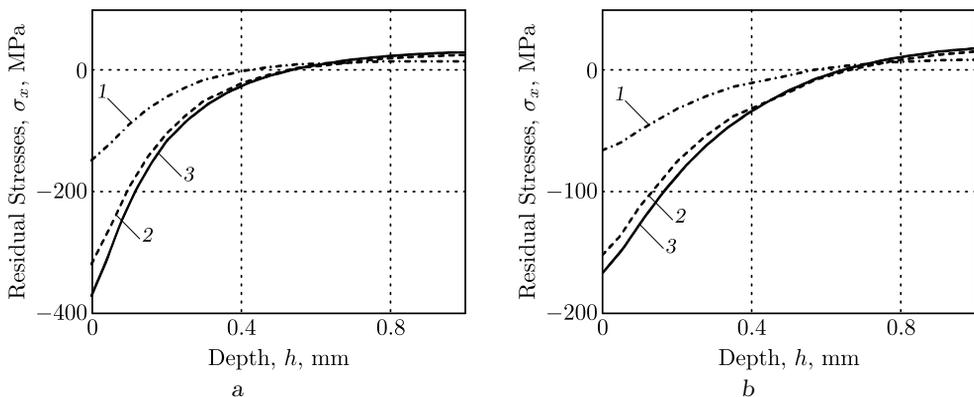


Рис. 4. Распределение остаточных напряжений $\sigma_x = \sigma_x(h)$ в наименьшем сечении балки с концентратором $\rho = 0.3$ мм (а) и $\rho = 0.5$ мм (b) при различных величинах области упрочнения. Цифры: 1 – $k = 2$ мм; 2 – $k = 6$ мм; 3 – $k = 49.7$ мм (а), $k = 49.5$ мм (b)

[Figure 4. Distribution of residual stresses $\sigma_x = \sigma_x(h)$ in the smallest section of a beam with a concentrator of $\rho = 0.3$ mm (a) and $\rho = 0.5$ mm (b) at various values of the hardening region. Labels: 1 – $k = 2$ mm; 2 – $k = 6$ mm; 3 – $k = 49.7$ mm (a), $k = 49.5$ mm (b)]

ОППД под изготовление концентратора напряжений существует оптимальная зона упрочнения, увеличение которой не приводит к изменения НДС в минимальном сечении балки с надрезом. Этот результат можно применять для назначения оптимальных режимов упрочнения поверхности призматических тел при использовании ОППД.

Выводы.

1. Разработана методика численного исследования влияния величины области упрочнения грани балки с надрезом на напряженно-деформированное состояние в наименьшем сечении балки.
2. Выполнено детальное исследование полей остаточных напряжений в наименьшем сечении балки с надрезом в широком диапазоне величины зоны упрочнения и радиусов надреза $\rho = \{0.1; 0.3; 0.5\}$ мм. Показано, что при величине зоны упрочнения $k \geq 8$ мм (примерно 16–20 % от площади всей грани) напряженно-деформированное состояние в наименьшем сечении практически стабилизируется.
3. Показано, что если радиус полукруглого надреза меньше толщины упрочненного слоя (области сжатия материала), происходит увеличение (по модулю) компоненты $\sigma_x = \sigma_x(h)$ в наименьшем сечении балки по сравнению с этой величиной в бездефектной балке при всех $k \geq 8$ мм, а если радиус надреза больше толщины упрочненного слоя, то наблюдается уменьшение (по модулю) этой компоненты остаточных напряжений.

Конкурирующие интересы. Мы заявляем, что у нас нет конфликта интересов в отношении авторства и публикации этой статьи.

Авторская ответственность. Мы несем полную ответственность за предоставление окончательной рукописи в печать. Каждый из нас одобрил окончательную версию рукописи.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-01-00550_a).

Библиографический список

1. Биргер И. А. *Остаточные напряжения*. М.: Машгиз, 1963. 232 с.
2. Гринченко И. Г. *Упрочнение деталей из жаропрочных и титановых сплавов*. М.: Машиностроение, 1971. 120 с.
3. Сулима А. М., Шувалов В. А., Ягодкин Ю. Д. *Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин*. М.: Машиностроение, 1988. 240 с.
4. Кудрявцев И. В. *Поверхностный наклеп для повышения прочности и долговечности деталей машин поверхностным пластическим деформированием*. М.: Машиностроение, 1969. 100 с.
5. Ножницкий Ю. А., Фишгойт А. В., Ткаченко Р. И., Теплова С. В. Разработка и применение новых методов упрочнения деталей ГТД, основанных на пластическом деформировании поверхностных слоев // *Вестник двигателестроения*, 2006. №2. С. 8–16.
6. Brockman R. A., Braisted W. R., Olson S. E., et. al. Prediction and characterization of residual stresses from laser shock peening // *Intern. J. Fatigue*, 2012. vol.36, no.1. pp. 96–108. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2011.08.011>.
7. Dai K., Shaw L. Analysis of fatigue resistance improvements via surface severe plastic deformation // *Intern. J. Fatigue*, 2008. vol.30, no.8. pp. 1398–1408. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2007.10.010>.

8. James M. N., Hughes D. J., Chen Z., et. al. Residual stresses and fatigue performance // *Eng. Fail. Analysis*, 2007. vol. 14, no. 2. pp. 384–395. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2006.02.011>.
9. Majzoobi G. H., Azadikhah K., Nemati J. The effects of deep rolling and shot peening on fretting fatigue resistance of Aluminum-7075-T6 // *Mater. Sci. Eng. A*, 2009. vol. 516, no. 1–2. pp. 235–247. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.03.020>.
10. Soady K. A. Life assessment methodologies incorporating shot peening process effects: mechanistic consideration of residual stresses and strain hardening. Part 1 – Effect of shot peening on fatigue resistance // *Mater. Sci. Technol.*, 2013. vol. 29, no. 6. pp. 673–651. <https://doi.org/10.1179/1743284713Y.0000000222>.
11. Terres M. A., Laalai N., Sidhom H. Effect of nitriding and shot-peening on the fatigue behavior of 42CrMo4 steel: Experimental analysis and predictive approach // *Mater. Design*, 2012. vol. 35. pp. 741–748. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.09.055>.
12. Павлов В. Ф., Кирпичев В. А., Вакулюк В. С. *Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям*. Самара: Самар. науч. центр РАН, 2012. 125 с.
13. Саушкин М. Н., Куров А. Ю. Анализ напряженного состояния в надрезах полукруглого профиля после опережающего поверхностного пластического деформирования сплошных цилиндрических образцов // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2012. № 1(26). С. 133–140. <https://doi.org/10.14498/vsgtu1039>.
14. Радченко В. П., Куров А. Ю. Влияние анизотропии поверхностного пластического упрочнения на формирование остаточных напряжений в цилиндрических деталях с надрезами полукруглого профиля // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2016. Т. 20, № 4. С. 675–690. <https://doi.org/10.14498/vsgtu1513>.
15. Сазанов В. П. Исследование закономерностей остановки усталостной трещины в цилиндрическом образце с надрезом // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*, 2018. Т. 17, № 1. С. 160–169. <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2018-17-1-160-169>.
16. Doremus L., Cormier J., Villechaise P., et. al. Influence of residual stresses on the fatigue crack growth from surface anomalies in a nickel-based superalloy // *Mater. Sci. Eng. A*, 2015. vol. 644. pp. 234–246. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.07.077>.
17. Fleury R. M. N., Nowell D. Evaluating the influence of residual stresses and surface damage on fatigue life of nickel superalloys // *Intern. J. Fatigue*, 2017. vol. 105. pp. 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.08.015>.
18. Павлов В. Ф., Букатый А. С., Семенова О. Ю. Прогнозирование предела выносливости поверхностно-упрочненных деталей с концентраторами напряжений // *Вестник машиностроения*, 2019. № 1. С. 3–7.
19. Иванов С. И., Шатунов М. П., Павлов В. Ф. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом / *Вопросы прочности элементов авиационных конструкций*. Т. 3. Куйбышев: КуАИ, 1974. С. 88–95.
20. Павлов В. Ф., Столяров А. К., Вакулюк В. С., Кирпичев В. А. *Расчет остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям*. Самара: Самар. науч. центр РАН, 2008. 124 с.
21. Вакулюк В. С., Павлов В. Ф., Сазанов В. П., Семенов О. Ю. Оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости деталей в условиях концентрации напряжений / *Материалы X Всероссийской конференции по механике деформируемого твердого тела* (18–22 сентября 2017 г., Самара, Россия). Т. 1. Самара: СамГТУ, 2017. С. 103–106.
22. Павлов В. Ф., Письмаров А. В., Сазанов В. П., Сургутанов Н. А. Исследование зависимости коэффициента интенсивности напряжений от глубины трещины в деталях с надрезом / *Материалы X Всероссийской конференции по механике деформируемого твердого тела* (18–22 сентября 2017 г., Самара, Россия). Т. 2. Самара: СамГТУ, 2017. С. 132–135.

23. Радченко В. П., Саушкин М. Н., Бочкова Т. И. Математическое моделирование формирования и релаксации остаточных напряжений в плоских образцах из сплава ЭП742 после ультразвукового упрочнения в условиях высокотемпературной ползучести // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*, 2016. № 1. С. 93–112. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2016.1.07>.
24. Радченко В. П., Шишкин Д. М. Метод реконструкции остаточных напряжений в призматическом образце с надрезом полукруглого профиля после опережающего поверхностного пластического деформирования // *Изв. Саратов. ун-та. Нов. Сер. Математика. Механика. Информатика*, 2020. Т. 20, № 4. С. 478–492. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2020-20-4-478-492>.
25. Вакулюк В. С. Исследование влияния толщины упрочненного слоя на остаточные напряжения во впадине концентратора методом первоначальных деформаций // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2010. № 1(20). С. 222–225. <https://doi.org/10.14498/vsgtu782>.
26. Сазанов В. П., Кирпичев В. А., Вакулюк В. С., Павлов В. Ф. Определение первоначальных деформаций в упрочненном слое цилиндрической детали методом конечно-элементного моделирования с использованием расчётного комплекса PATRAN/NASTRAN // *Вестн. Уфим. гос. авиац. техн. ун-та*, 2015. Т. 19, № 2. С. 35–40.
27. Радченко В. П., Афанасьева О. С., Глебов В. Е. Влияние технологии поверхностного пластического упрочнения, остаточных напряжений и граничных условий на выпучивание балки // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*, 2020. № 1. С. 87–98. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2020.1.07>.

MSC: 74A10, 74D10

The influence of the dimensions of the surface hardening region on the stress-strain state of a beam with a notch of a semicircular profile

© V. P. Radchenko, D. M. Shishkin

Samara State Technical University,

244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation.

Abstract

The influence of a size of the surface-plastic hardening region on the stress-strain state of a beam with a notch of a semicircular profile is investigated. The problem is reduced to a boundary value problem of fictitious thermoelasticity with the initial (plastic) deformations modeled by temperature anisotropic deformations in an inhomogeneous temperature field. The solution is based on the finite element method.

For model calculations, experimental data on the distribution of residual stresses in a smooth beam made of EP742 alloy after ultrasonic mechanical hardening were used as initial information. A variative numerical analysis of the effect of the notch radius and the size of the hardening zone of the beam face on the distribution of the components of the residual stress tensor in the smallest section from the bottom of the concentrator is carried out.

It is shown that when the hardening zone is more than 16–20% of the entire face area, the stress-strain state in the smallest section is practically stabilized. It was established that if the radius of the semicircular notch is less than the thickness of the hardened layer (the material compression area), an increase (in modulus) of the normal longitudinal component of the residual stress tensor occurs, and if the radius of the notch is greater than the thickness of the hardened layer, then a decrease (in modulus) of this value is observed in comparison with a similar component for a smooth reinforced beam for all values of the hardening zone more than 16–20% of the entire face area of the beam.

An experimental verification of the developed numerical method based on the finite element method for a beam with a fully hardened face is performed.

Keywords: advanced surface plastic hardening, area of hardening, semicircular notch, beam, EP742 alloy, residual stresses.

Received: 25th September, 2020 / Revised: 11th November, 2020 /Accepted: 16th November, 2020 / First online: 25th December, 2020

Research Article

 The content is published under the terms of the [Creative Commons Attribution 4.0 International License](http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Please cite this article in press as:

Radchenko V. P., Shishkin D. M. The influence of the dimensions of the surface hardening region on the stress-strain state of a beam with a notch of a semicircular profile, *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ., Ser. Fiz.-Mat. Nauki* [J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. Math. Sci.], 2020, vol. 24, no. 4, pp. 663–676. <https://doi.org/10.14498/vsgtu1828> (In Russian).

Authors' Details:

Vladimir P. Radchenko  <https://orcid.org/0000-0003-4168-9660>

Dr. Phys. & Math. Sci., Professor; Head of Department; Dept. of Applied Mathematics & Computer Science; e-mail: radchenko.vp@samgtu.ru

Dmitry M. Shishkin  <https://orcid.org/0000-0003-3205-2262>

Postgraduate Student; Dept. of Applied Mathematics & Computer Science; e-mail: shishkin.dim@yandex.ru

Competing interests. We declare that we have no conflicts of interest in the authorship and publication of this article.

Authors' contributions and responsibilities. We are fully responsible for submitting the final manuscript in print. Each of us has approved the final version of manuscript.

Funding. This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 19-01-00550_a).

References

1. Birger I. A. *Ostatochnye napriazheniia* [Residual Stresses]. Moscow, Mashgiz, 1963, 232 pp. (In Russian)
2. Grinchenko I. G. *Uprochnenie detalei iz zharoprochnykh i titanovykh splavov* [Hardening Parts Made of High-Resistant and Titanium Alloys]. Moscow, Mashinostroenie, 1971, 120 pp. (In Russian)
3. Sulima A. M., Shuvalov V. A., Yagodkin Yu. D. *Poverkhnostnyi sloi i ekspluatatsionnye svoistva detalei mashin* [Surface Layer and Performance of Machine Parts]. Moscow, Mashinostroenie, 1988, 240 pp. (In Russian)
4. Kudryavtsev I. V. *Poverkhnostnyi naklep dlia povysheniia prochnosti i dolgovechnosti detalei mashin poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Surface Strain Hardening to Increase the Strength and Durability of Machine Parts]. Moscow, Mashinostroenie, 1969, 100 pp. (In Russian)
5. Nozhnitskii Yu. A., Fishgoit A. V., Tkachenko R. I., Teplova S. V. Development and application of new GTE parts hardening methods based on the plastic deformation of the surface layers, *Vestn. Dvigatel.*, 2006, no. 2, pp. 8–16 (In Russian).
6. Brockman R. A., Braisted W. R., Olson S. E., et. al. Prediction and characterization of residual stresses from laser shock peening, *Intern. J. Fatigue*, 2012, vol. 36, no. 1, pp. 96–108. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2011.08.011>.
7. Dai K., Shaw L. Analysis of fatigue resistance improvements via surface severe plastic deformation, *Intern. J. Fatigue*, 2008, vol. 30, no. 8, pp. 1398–1408. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2007.10.010>.
8. James M. N., Hughes D. J., Chen Z., et. al. Residual stresses and fatigue performance, *Eng. Fail. Analysis*, 2007, vol. 14, no. 2, pp. 384–395. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2006.02.011>.
9. Majzooobi G. H., Azadikhah K., Nemati J. The effects of deep rolling and shot peening on fretting fatigue resistance of Aluminum-7075-T6, *Mater. Sci. Eng. A*, 2009, vol. 516, no. 1–2, pp. 235–247. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.03.020>.
10. Soady K. A. Life assessment methodologies incorporating shot peening process effects: mechanistic consideration of residual stresses and strain hardening. Part 1 – Effect of shot peening on fatigue resistance, *Mater. Sci. Technol.*, 2013, vol. 29, no. 6, pp. 673–651. <https://doi.org/10.1179/1743284713Y.0000000222>.
11. Terres M. A., Laalai N., Sidhom H. Effect of nitriding and shot-peening on the fatigue behavior of 42CrMo4 steel: Experimental analysis and predictive approach, *Mater. Design*, 2012, vol. 35, pp. 741–748. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.09.055>.
12. Pavlov V. F., Kirpichev V. A., Vakulyuk V. S. *Prognozirovaniie soprotivleniia ustalosti poverkhnostno uprochnennykh detalei po ostatochnym napriazheniiam* [Prediction of Fatigue Resistance of Surface Reinforced Parts by Residual Stresses]. Samara, Samara Sci. Center of RAS, 2012, 125 pp. (In Russian)
13. Saushkin M. N., Kurov A. Yu. Analysis of stress state in semicircular profile notches after preliminary surface plastic deformation of solid cylindrical specimens, *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ., Ser. Fiz.-Mat. Nauki* [J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. Math. Sci.], 2012, no. 1(26), pp. 133–140 (In Russian). <https://doi.org/10.14498/vsgtu1039>.
14. Radchenko V. P., Kurov A. Yu. Effect of anisotropy of surface plastic hardening on formation of residual stresses in cylindrical samples with semicircular notch, *Vestn. Samar. Gos. Tekhn.*

- Univ., Ser. Fiz.-Mat. Nauki* [J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. Math. Sci.], 2016, vol. 20, no. 4, pp. 675–690 (In Russian). <https://doi.org/10.14498/vsgtu1513>.
15. Sazanov V. P. Analysis of the mechanism of fatigue crack arrest in a cylindrical notched specimen, *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2018, vol. 17, no. 1, pp. 160–169 (In Russian). <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2018-17-1-160-169>.
 16. Doremus L., Cormier J., Villedaise P., et. al. Influence of residual stresses on the fatigue crack growth from surface anomalies in a nickel-based superalloy, *Mater. Sci. Eng. A*, 2015, vol. 644, pp. 234–246. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.07.077>.
 17. Fleury R. M. N., Nowell D. Evaluating the influence of residual stresses and surface damage on fatigue life of nickel superalloys, *Intern. J. Fatigue*, 2017, vol. 105, pp. 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.08.015>.
 18. Pavlov V. F., Bukatyi A. S., Semyonova O. Yu. Forecasting of the endurance limit of surface-hardened parts with stress concentrators, *Russian Engineering Research*, 2019, no. 1, pp. 3–7 (In Russian).
 19. Ivanov S. I., Shatunov M. P., Pavlov V. F. Influence of residual stresses on notched specimen endurance, In: *Problems of Strength of Aircraft Structure Elements*, vol. 3. Kuibyshev, Kuibyshev Aviation Inst., 1974, pp. 88–95 (In Russian).
 20. Pavlov V. F., Stolyarov A. K., Vakulyuk V. S., Kirpichev V. A. *Raschet ostatochnykh napriazhenii v detaliakh s kontsentratorami napriazhenii po pervonachal'nym deformatsiam* [Calculation of Residual Stresses in Parts with Stress Concentrators by Initial Deformations]. Samara, Samara Sci. Center of RAS, 2008, 124 pp. (In Russian)
 21. Vakulyuk V. S., Pavlov V. F., Sazanov V. P., Semyonova O. Yu. The evaluation of the surface hardening influence on the endurance limit of parts under stress concentration conditions, In: *Proceedings of the Tenth Russian Conference on Solid Mechanics* (September, 18–22, 2017, Samara, Russian Federation), vol. 1. Samara, Samara State Technical Univ., 2017, pp. 103–106 (In Russian).
 22. Pavlov V. F., Pis'marov A. V., Sazanov V. P., Surgutanov N. A. Investigation of the dependence of the stress intensity factor on the crack depth in the notched details, In: *Proceedings of the Tenth Russian Conference on Solid Mechanics* (September, 18–22, 2017, Samara, Russian Federation), vol. 2. Samara, Samara State Technical Univ., 2017, pp. 132–135 (In Russian).
 23. Radchenko V. P., Saushkin M. N., Bochkova T. I. Mathematical modeling and experimental study of forming and relaxation of the residual stresses in plane samples made of EP742 alloy after the ultrasonic hardening under the hightemperature creep conditions, *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2016, no. 1, pp. 93–112 (In Russian). <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2016.1.07>.
 24. Radchenko V. P., Shishkin D. M. The method of reconstruction of residual stresses in a prismatic specimen with a notch of a semicircular profile after advanced surface plastic deformation, *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Math. Mech. Inform.*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 478–492 (In Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2020-20-4-478-492>.
 25. Vakuljuk V. S. Investigation of influence of thickness hardened layer on the residual stresses in basin concentrator using initial strain, *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ., Ser. Fiz.-Mat. Nauki* [J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. Math. Sci.], 2010, no. 1(20), pp. 222–225 (In Russian). <https://doi.org/10.14498/vsgtu782>.
 26. Sazanov V. P., Kirpichev V. A., Vakulyuk V. S., Pavlov V. F. The definition of initial deformations in the cylindrical parts surface layer by Finite Elements Modeling method using PATRAN/NASTRAN program complex, *Vestn. Ufimsk. Gos. Aviats. Techn. Univ.*, 2015, vol. 19, no. 2, pp. 35–40 (In Russian).
 27. Radchenko V. P., Afanaseva O. S., Glebov V. E. The effect of surface plastic hardening technology, residual stresses and boundary conditions on the buckling of a beam, *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2020, no. 1, pp. 87–98 (In Russian). <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2020.1.07>.