

УДК 539.3:004.94

А. И. ВЕРЕМЕЙЧИК, М. В. НЕРОДА, Б. Г. ХОЛОДАРЬ
Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗОН С ИЗМЕНЕННЫМИ ПОСЛЕ ТЕРМООБРАБОТКИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ МАТЕРИАЛА НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ОБРАЗЦОВ

Проведено компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния образцов с обработанной зоной сегментовидного сечения и промежуточной зоной серповидной формы при растяжении. Исследованы продольные и эквивалентные напряжения в зависимости от механических характеристик материала зон и их геометрических размеров. Определены коэффициенты концентрации напряжений в окрестности зон термообработки.

Ключевые слова: напряжения, модуль упругости, коэффициент Пуассона, коэффициент концентрации, напряженно-деформированное состояние.

Введение. Использование лазерного, плазменного и других высокоэнергетических методов термообработки позволяет улучшить многие эксплуатационные показатели материалов. При этом вдоль обрабатываемой дорожки в металле возникают зоны измененной структуры материала: зона целевого воздействия и окружающая ее зона термического влияния, в которых ввиду локальности и объемной неравномерности нагрева имеют место значительные изменения фазового и структурного состояний металла. Высокие скорости нагрева определяют особенности протекания фазовых превращений как при нагреве, так и при охлаждении, а наличие градиента температур и напряжений – различие в процессах фазовых и структурных превращений по глубине обработанной области.

Результаты исследований [1–4] показывают, что в зоне термического влияния структура заметно отличается как от структуры зоны обработки, так и от исходной структуры. В литературных источниках широко представлены результаты измерений микротвердости поверхностной зоны материалов, ее износостойкости [5–8], но данные о механических характеристиках материала в этих областях (модуль упругости, коэффициент Пуассона, пределы прочности и текучести) ограничены. Однозначные аналитические зависимости между ними отсутствуют, что приводит к неопределенности их значений и, в свою очередь, затрудняет прогнозирование поведения термообработанного объекта в условиях эксплуатации.

В литературных источниках также недостаточно внимания уделено вопросам влияния различий механических характеристик зон материала, возникших после сосредоточенного высокоэнергетического воздействия, на напряженно-деформированное состояние (НДС) деталей и возможные гра-

ницы его изменения по сравнению со случаем отсутствия такого воздействия. Вопрос о концентрации напряжений в материале обработанных образцов при их растяжении рассматривался в [9, 10] для случаев, когда сечение дорожки представляло собой прямоугольник или полукруг. В настоящей работе представлен случай дорожки в виде сегмента круга разной высоты при сохранении исходной площади сечения прямоугольного образца.

Постановка задачи. Для исследования влияния различий модуля упругости и коэффициента Пуассона двух новообразованных зон образца по сравнению с характеристиками основного материала проведено конечно-элементное моделирование растяжения стержня с зоной обработанного материала, имеющей сечение в форме сегмента, окруженного промежуточной зоной термического влияния постоянной толщины. По аналогии с [10] ввиду симметрии системы рассматривается выделенная четверть образца (рисунок 1).

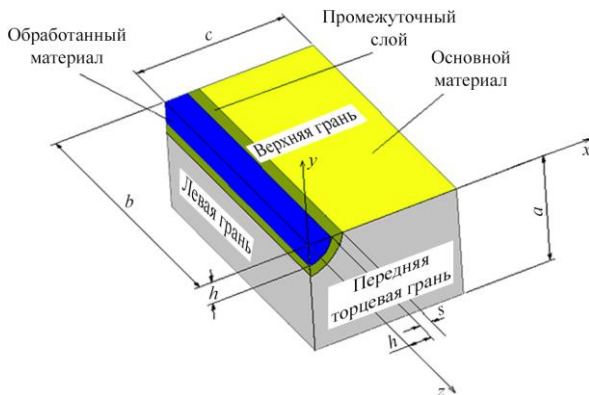


Рисунок 1 – Выделенный элемент

Левый верхний угол занимает область обработанного материала, окруженного переходной зоной. Толщина обработанного материала варьировалась в пределах $h = 0,1 \dots 0,4$ мм, переходной зоны – $s = 0,05 \dots 0,2$ мм. Остальной объем занят исходным (основным) материалом. Габаритные размеры модели $a \times b \times c = 2,0 \times 2,6 \times 4,4$ мм.

Граничные условия задавались в виде ограничения перемещения в направлении оси Oy ($V_y = 0$) в точках верхней грани тела, в направлении оси Oz ($W_z = 0$) по задней торцевой грани, Ox ($U_x = 0$) – по левой грани. На правой продольной грани задавались граничные условия двух видов: $U_x \neq 0$ – стержневой образец или $U_x = 0$ – имитация стесненной деформации (что справедливо, например, для пластин). Нагружение осуществлялось заданием перемещения передней торцевой грани на величину $w_z = 0,0044$ мм, которая определена из условия равенства осевых напряжений $\sigma_z = 200$ МПа для однородного стержня.

Модуль упругости исходного материала принимался равным $E = E_{bas} = 200$ ГПа, коэффициент Пуассона $\mu = \mu_{bas} = 0,3$. Модули упругости

промежуточного и обработанного слоев и их коэффициенты Пуассона варьировались, но принято, что после обработки материал тела во всех его точках остается в упругой области работы при одинаковой температуре.

Расчет НДС в моделях образцов проводился в диапазоне отношений модулей упругости и коэффициентов Пуассона обработанного материала к характеристикам исходного материала:

$$K_E = \frac{E_{pr}}{E_{bas}}, K_\mu = \frac{\mu_{pr}}{\mu_{bas}} \text{ в пределах } 0,6-1,4.$$

При расчетах принималось

$$E_{int} = \frac{E_{bas} + E_{pr}}{2}, \mu_{int} = \frac{\mu_{bas} + \mu_{pr}}{2}.$$

Индексы «*bas*», «*int*», «*pr*» относятся соответственно к исходному материалу, промежуточному слою и обработанному объему. Для расчетов применялся программный комплекс *ANSYS Workbench*.

НДС материала далее представлено через эквивалентные напряжения по Мизесу $\sigma_{эКВ}$ и продольные напряжения σ_z . Значения напряжений являются средними для соответствующих элементов. Напряжения в угловых точках элементов достаточно близки к ним и не используются ввиду малости размеров конечных элементов по сравнению с габаритными размерами тела. Главные напряжения σ_1 близки к продольным напряжениям σ_z , поэтому их уровни не выведены отдельно. Для рассматриваемой формы сечения результаты расчетов показаны на рисунках 2–9. В [10] аналогичные данные приведены для обработанного слоя в форме полукруга.

Некоторые результаты исследований. На рисунке 2 показаны распределения эквивалентных по критерию Мизеса напряжений $\sigma_{эКВ}$ по объему материала для разных геометрических условий закрепления при высоте сегмента обработанной зоны 0,3 и 0,2 мм для предельных из рассматриваемых значений модулей упругости и коэффициентов Пуассона.

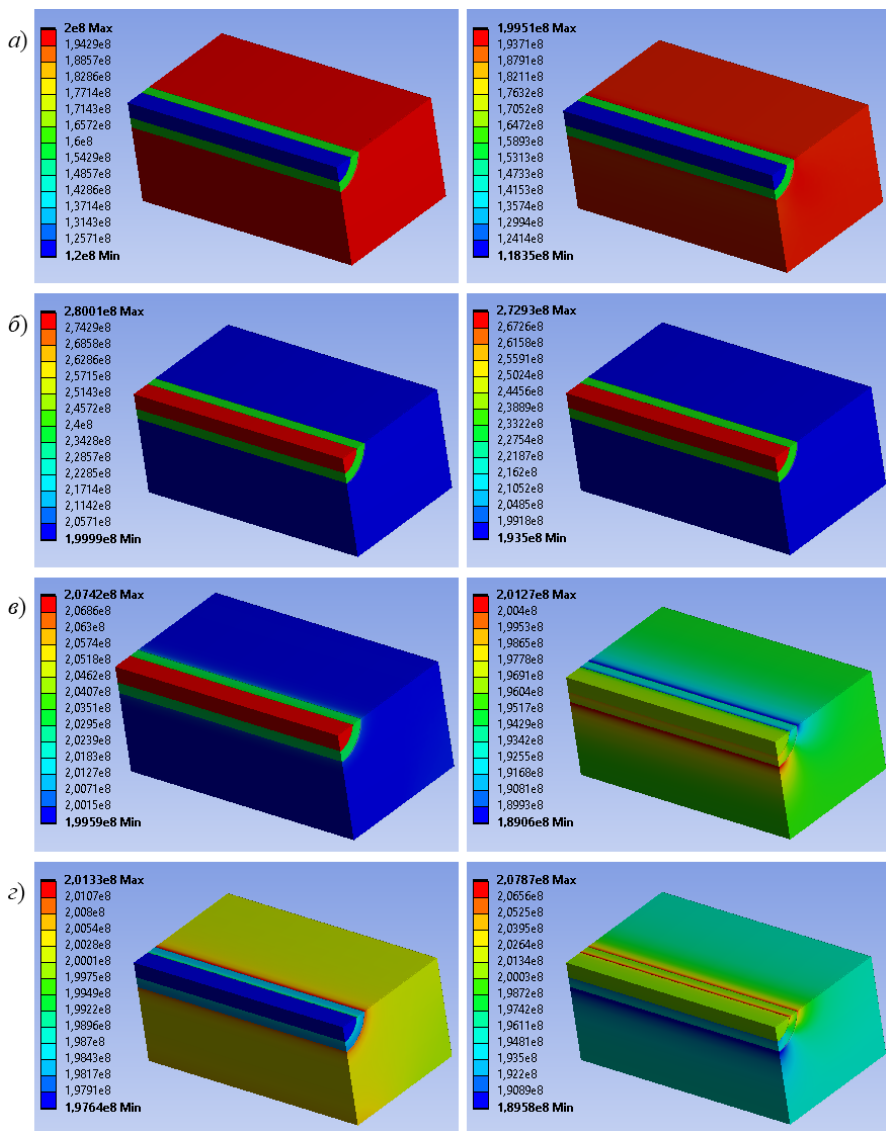
На рисунках 3, 4 приведены зависимости наибольших эквивалентных напряжений в модели образца от K_E и K_μ .

Расчеты показывают, что любое изменение характеристик материала обработанного и промежуточного слоев по отношению к основному материалу приводит к изменению НДС образцов. Максимальные по уровню напряжения могут возникать как в обработанном слое, так и в основном материале или промежуточной зоне. При свободной правой грани влияние размеров зоны обработанного материала на напряжения значительно ниже, чем при стесненной деформации.

Толщина h зоны прямого воздействия (ядра обработанного материала) практически не влияет на эквивалентные напряжения при варьировании модуля упругости (см. рисунок 3). С ростом K_E при $K_E > 1$ эквивалентные напряжения $\sigma_{эКВ}$ линейно возрастают.

Свободная правая грань

Закрепленная правая грань

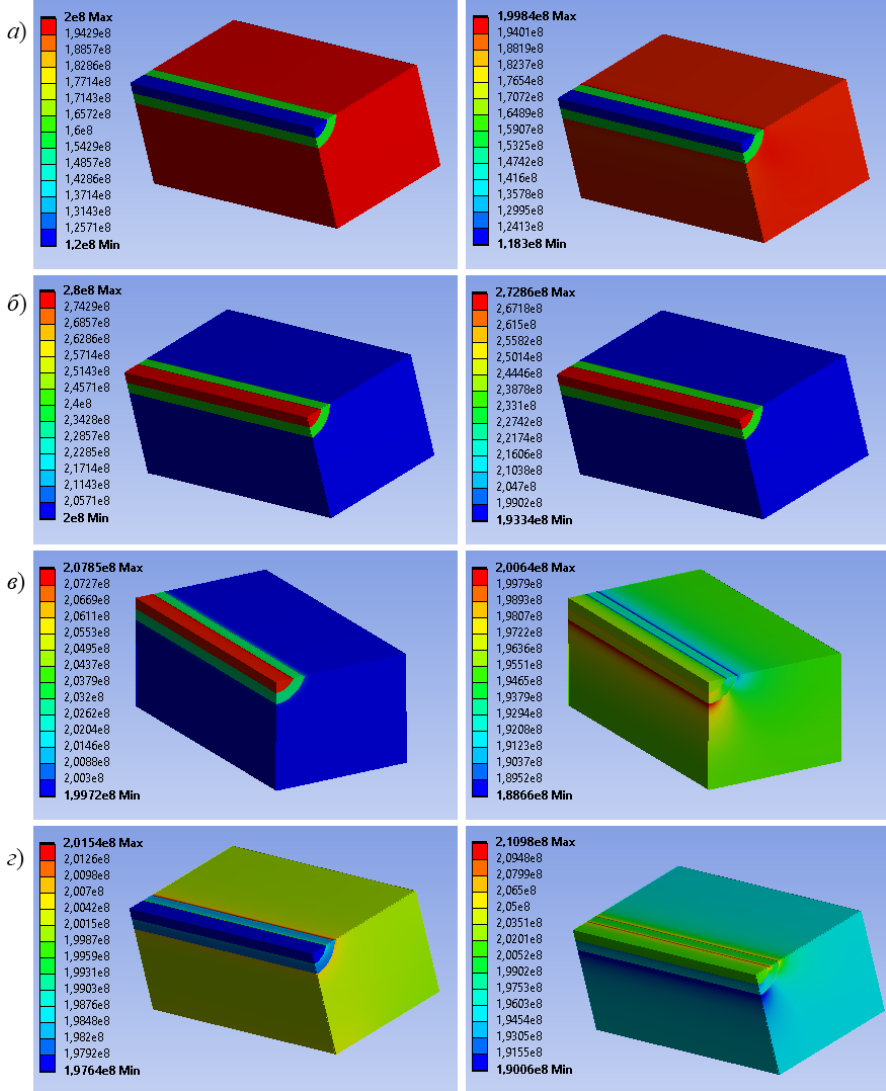


$h = 0,3 \text{ мм}$

Рисунок 2 (начало) – Распределение эквивалентных напряжений в образце

Свободная правая грань

Закрепленная правая грань



$h = 0,2$ мм

Рисунок 2 (окончание) – Распределение эквивалентных напряжений в образце:

$\alpha - E_{bas} = 200$ ГПа, $E_{int} = 160$ ГПа, $E_{pr} = 120$ ГПа, $\mu_{bas} = \mu_{int} = \mu_{pr} = 0,3$;

$\beta - E_{bas} = 200$ ГПа, $E_{int} = 240$ ГПа, $E_{pr} = 280$ ГПа, $\mu_{bas} = \mu_{int} = \mu_{pr} = 0,3$;

$\theta - E_{bas} = E_{int} = E_{pr} = 200$ ГПа, $\mu_{bas} = 0,3$, $\mu_{int} = 0,24$, $\mu_{pr} = 0,18$;

$\varepsilon - E_{bas} = E_{int} = E_{pr} = 200$ ГПа, $\mu_{bas} = 0,3$, $\mu_{int} = 0,36$, $\mu_{pr} = 0,42$

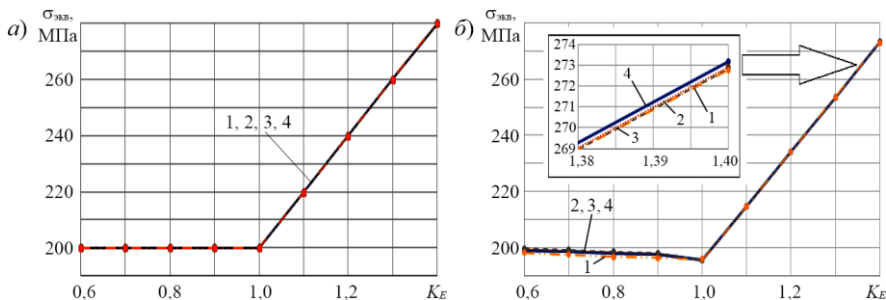


Рисунок 3 – Зависимость наибольших эквивалентных напряжений от K_E для случаев
a – свободной и *б* – закрепленной правой грани:
 1 – $h = 0,1$ мм; 2 – $h = 0,2$ мм; 3 – $h = 0,3$ мм; 4 – $h = 0,4$ мм;

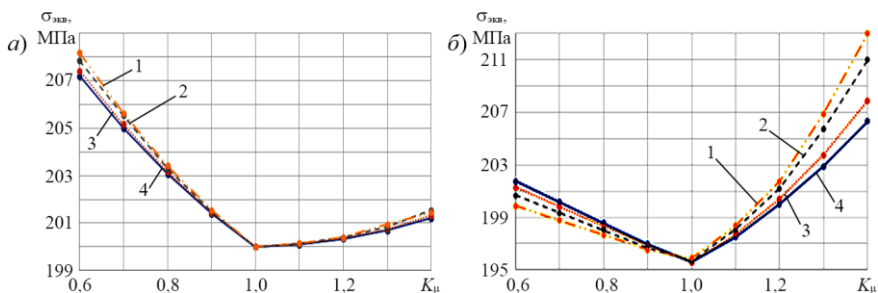


Рисунок 4 – Зависимость наибольших эквивалентных напряжений от K_μ для случаев
a – свободной и *б* – закрепленной правой грани:
 1 – $h = 0,1$ мм; 2 – $h = 0,2$ мм; 3 – $h = 0,3$ мм; 4 – $h = 0,4$ мм;

При свободной правой грани (см. рисунок 4, *a*) в диапазоне $K_\mu = 0,6-1,0$ эквивалентные напряжения практически не изменяются (уменьшаются на 4 %), а для $K_\mu > 1$ незначительно возрастают. При этом на всём диапазоне K_μ эквивалентные напряжения выше для меньших толщин h обработанного материала. В случае стесненной деформации картина распределения эквивалентных напряжений иная – при $K_\mu = 0,6...1,4$ эквивалентные напряжения у образца с ядром сечения в форме полукруга выше, чем у образца с ядром сегментовидного сечения, а при $K_\mu > 1$ эквивалентные напряжения возрастают у образцов с небольшой толщиной обработанного материала.

На рисунке 5 приведены зависимости коэффициента концентрации напряжений $K_\sigma = \sigma_z^{\max} / \sigma_N$ как отношения максимальных продольных напряжений σ_z^{\max} к значению номинальных продольных напряжений, соответствующему случаю $K_E = K_\mu = 1$, в зависимости от отношений K_E или K_μ для случая закрепленной правой грани (в случае свободной правой грани различия между коэффициентами концентрации напряжений при варьировании K_E и K_μ незначительны).

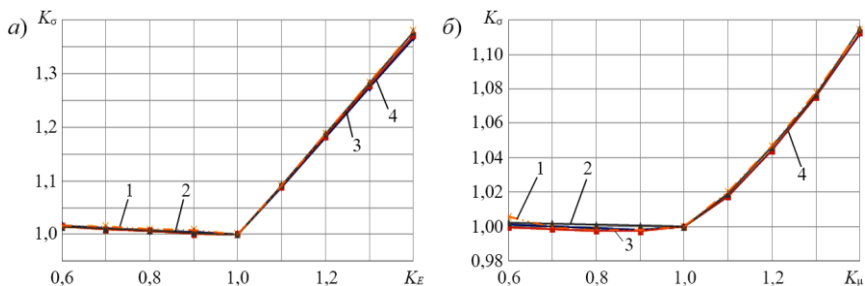


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента концентрации напряжений от K_E (а) и K_μ (б) для случая стесненной деформации при $s = 0,2$ мм

Рассмотрено влияние размеров промежуточного слоя на характер распределения напряжений. Расчеты показали, что уровень напряжений практически не зависит от размеров ядра h обработанного материала. Толщина промежуточного слоя s также практически не влияет на уровень $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ и σ_z образцов при изменении K_E . Более заметно изменение величины s сказывается на напряжениях при некоторых значениях K_μ (рисунки 6, 7).

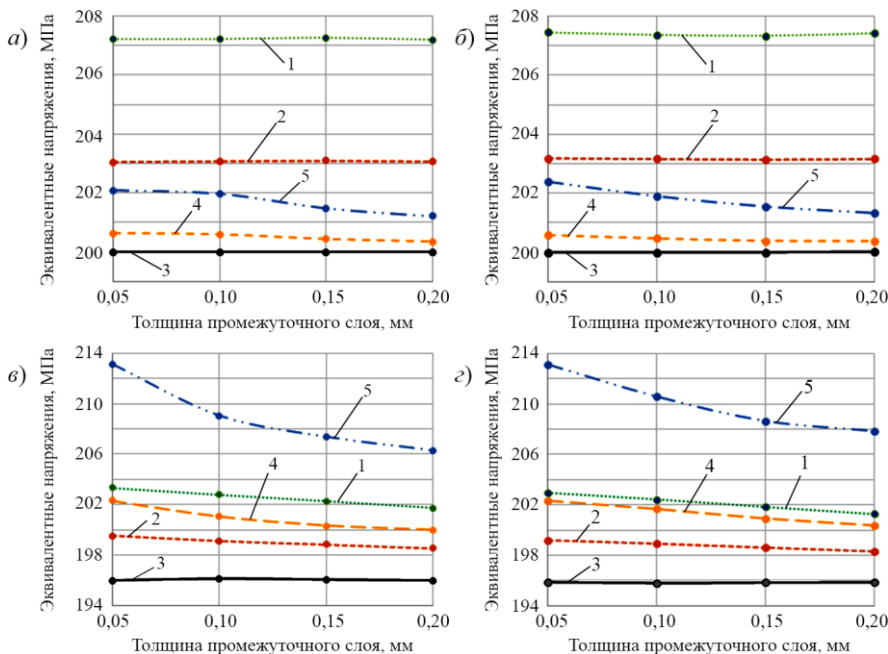


Рисунок 6 – Зависимость эквивалентных напряжений от толщины промежуточного слоя s ($E_{bas} = E_{int} = E_{pr} = 200$ ГПа) в случаях свободной (а, б) и закрепленной (в, з) правой грани при $h = 0,4$ мм (а, в) и $h = 0,3$ мм (б, з):
 1 – $K_\mu = 0,6$; 2 – $K_\mu = 0,8$; 3 – $K_\mu = 1,0$; 4 – $K_\mu = 1,2$; 5 – $K_\mu = 1,4$

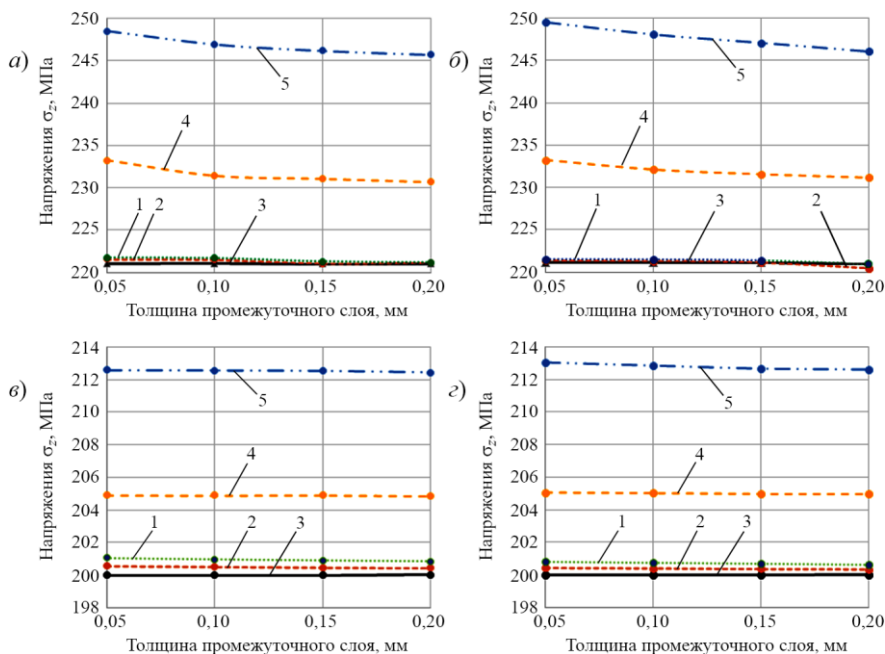


Рисунок 7 – Зависимость осевых напряжений σ_z от толщины промежуточного слоя s ($E_{bas} = E_{int} = E_{pr} = 200$ ГПа) в случаях свободной (а, б) и закрепленной (в, з) правой грани при $h = 0,4$ мм (а, в) и $h = 0,3$ мм (б, з):

$$1 - K_{\mu} = 0,6; 2 - K_{\mu} = 0,8; 3 - K_{\mu} = 1,0; 4 - K_{\mu} = 1,2; 5 - K_{\mu} = 1,4$$

Наибольшее влияние толщина промежуточного слоя оказывает на эквивалентные напряжения (см. рисунок 6) в случаях, когда коэффициент Пуассона обработанного слоя выше аналогичного параметра основного материала, причем изменение эквивалентных напряжений имеет нелинейный характер и с ростом толщины промежуточного слоя уровень напряжений снижается. Установлено незначительное изменение продольных напряжений (см. рисунок 7) при изменении размеров промежуточной зоны.

Более наглядно влияние изменения механических характеристик материала в зоне обработки высокоэнергетическими потоками может быть представлено через коэффициенты концентрации напряжений. В качестве примера на рисунке 8 показано влияние толщины промежуточного слоя на коэффициенты концентрации напряжений при изменениях K_{μ} для полукруглой формы сечения обработанной зоны (для сечений в форме сегмента она выражена в меньшей степени). Различие в модулях упругости практически не изменяет K_{σ} .

Как видно из рисунков 8, 9, наибольшие эквивалентные и продольные напряжения возникают при наименьшей толщине s промежуточной зоны, причем при $s > 0,1$ мм продольные напряжения для образца с обработанной

зоной в форме полукруга практически не зависят от толщины. Зависимость напряжений в интервале $0,6 \leq K_{\mu} \leq 1,0$ близка к линейной, при $K_{\mu} > 1,0$ графики имеют явно заметный нелинейный характер.

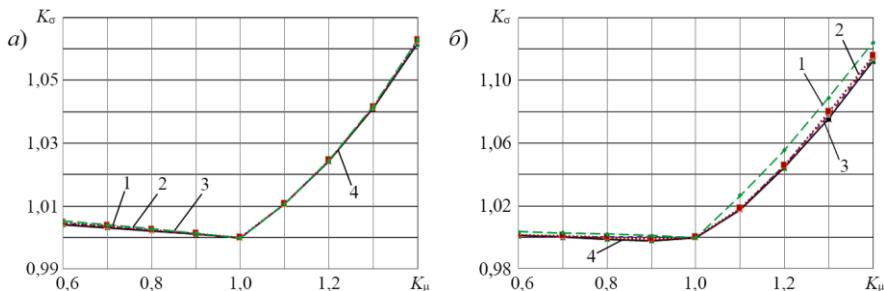


Рисунок 8 – Зависимость коэффициента концентрации напряжений в образце с полукруглым сечением от K_{μ} в случаях свободной (а) и закрепленной (б) правой грани при толщинах промежуточного слоя:

1 – $s = 0,05$ мм; 2 – $s = 0,10$ мм; 3 – $s = 0,15$ мм; 4 – $s = 0,20$ мм

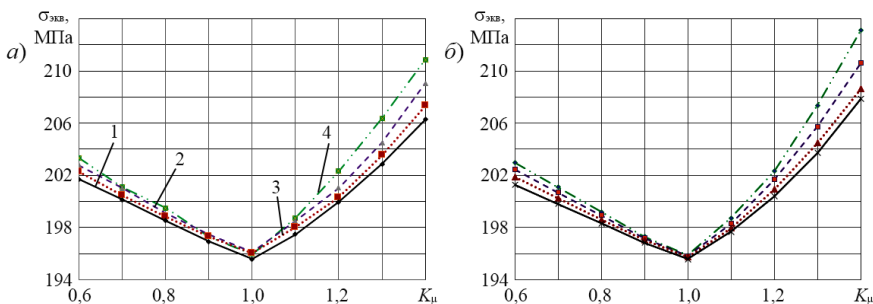


Рисунок 9 – Зависимость эквивалентных напряжений от K_{μ} при в случаях толщины ядра $h = 0,4$ мм (а) и $h = 0,3$ мм (б) при толщинах промежуточного слоя:

1 – $s = 0,05$ мм; 2 – $s = 0,10$ мм; 3 – $s = 0,15$ мм; 4 – $s = 0,20$ мм

Заключение. В широком диапазоне размеров и механических характеристик материала проведены исследования напряженно-деформированного состояния образцов с зонами, отличающимися трансформированной структурой материала, в случае их растяжения. Представлено распределение нормальных и эквивалентных напряжений для различной формы и характеристик материалов зон с измененной структурой. Для различных размеров поперечного сечения образцов получены зависимости напряжений и коэффициентов концентрации напряжений от модуля упругости, коэффициента Пуассона и размеров промежуточного слоя.

Установлено, что НДС образца зависит от глубины проникновения зон трансформированной структуры внутрь образца, а также характера и направления изменения основных механических характеристик материала.

Наибольшие напряжения (продольные и эквивалентные) изменяются нелинейно и достигают наибольших величин при максимальных значениях коэффициентов K_E и K_μ , кроме случая эквивалентных напряжений при свободной правой грани образца, когда они соответствуют минимальному исследованному значению $K_\mu = 0,6$. Любое отклонение от исходных параметров ведет к изменению распределения напряжений по объему образца. Максимальные напряжения возникают как в обработанном слое, так и в основном материале, промежуточном слое или на границах слоев.

Резкое отличие напряженного состояния и, соответственно, коэффициентов концентрации при $K_\mu < 1$ и $K_\mu > 1$ можно объяснить увеличением сдвиговой жесткости при уменьшении коэффициента Пуассона. Поэтому при малых значениях μ обработанной зоны по сравнению с коэффициентом Пуассона основного материала эффекты проявления сдвиговых деформаций уменьшаются, а напряженное состояние становится более однородным по объему тела. При этом одновременно возрастает и хрупкость материала обработанных слоев [12–14] и всего тела в целом.

Полученные результаты соответствуют и конкретизируют результаты, приведенные в работах [9–11], и подчеркивают важность проведения исследований по определению механических характеристик материалов в зоне измененной структуры, а также необходимость дальнейших исследований свойств материалов при наличии их обработки высокоэнергетическими струями в целях более точного прогнозирования работоспособности элементов конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Гуляев, А. П. Металловедение / А. П. Гуляев. – М. : Книга по требованию, 2020. – 542 с.

2 Иванцевский, В. В. Управление структурным и напряженным состоянием поверхностных слоев деталей машин при их упрочнении с использованием концентрированных источников нагрева и финишного шлифования : дис. ... д-ра техн. наук : 05.16.09 / В. В. Иванцевский. – Новосибирск, 2012. – 425 с.

3 Гулаков С. В. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния элементов составных конструкций при воздействии локального источника нагрева / С. В. Гулаков, С. В. Щербаков, Н. Г. Заварика // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2004. – Вип. 14. – С. 223–226.

4 Влияние режимов лазерной закалки на свойства стали 40X13 / О. М. Миширук [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2023. – Т. 68, № 2. – С. 103–112.

5 Safonov, E. N. Plasma hardening of medium carbon steels / E. N. Safonov, M. V. Mironova // Journal of Physics : Conference Series. – 2019. – Vol. 1353(1). – Article 012065. – 5 p.

6 Шарапова, Д. М. Эволюция структуры и свойств конструкционных низколегированных сталей при кратковременных локальных термических воздействиях кон-

центрированными источниками тепла : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.09 / Д. М. Шарпова. – СПб., 2018. – 140 с.

7 **Войтович, О. Н.** Исследование влияния параметров лазерной термообработки на свойства упрочненных поверхностных слоев / О. Н. Войтович, И. Н. Соколов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2013. – № 2. – С. 6–14.

8 **Fadara, T. G.** Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties and Microstructure of NST 37-2 Steel / T. G. Fadara, O. Y. Akanbi, D. A. Fadare // Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering. – 2011. – Vol. 10, no. 3. – P. 299–308.

9 **Веремейчик, А. И.** Конечно-элементное моделирование задачи о растяжении материала с зонами измененной структуры / А. И. Веремейчик, М. В. Нерода, Б. Г. Холодарь // Механика машин, механизмов и материалов. – 2022. – № 3 (60). – С. 77–84.

10 **Веремейчик, А. И.** Исследование напряженно-деформированного состояния образцов с серповидными зонами измененной структуры материала при осевом растяжении / А. И. Веремейчик // Механика. Исследования и инновации. – 2022. – Вып. 15. – С. 37–49.

11 **Веремейчик, А. И.** Влияние глубины зоны обработки материала высокоэнергетическим воздействием на его напряженно-деформированное состояние / А. И. Веремейчик, М. В. Нерода, Б. Г. Холодарь // Перспективные материалы и технологии : материалы Междунар. симпозиума, Минск, 21–25 августа 2023 г. – Минск : ИВЦ Минфина, 2023. – С. 282–284.

12 Расчеты на прочность в машиностроении. Т. 1 / под ред. С. Д. Пономарева. – М. : ГНТИ машиностроительной литературы, 1956. – 884 с.

13 **Холодарь, Б. Г.** Критерий максимального формоизменения как условие перехода материала в пластическое состояние / Б. Г. Холодарь // Деформация и разрушение материалов. – 2016. – № 3. – С. 2–5.

14 **Холодарь, Б. Г.** Максимальное формоизменение в точке тела и критерий текучести материала / Б. Г. Холодарь // Теория и практика исследований и проектирования в строительстве с применением систем автоматизированного проектирования (САПР) : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Брест, 30–31 марта 2017 г. – Брест : БрГТУ, 2017. – С. 169–174.

A. I. VERAMEICHYK, M. V. NERODA, B. G. HOLODAR
Brest State Technical University, Brest, Belarus

INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF ZONES WITH CHANGED MATERIAL CHARACTERISTICS AFTER HEAT TREATMENT ON THE STRESS-STRAIN STATE OF SAMPLES

A computer simulation of the stress-strain state of samples with a treated segmental cross-section zone and an intermediate sickle-shaped zone under tension is carried out. There are analyzed the longitudinal and equivalent stresses depending on the material mechanical characteristics of the zones and their geometric dimensions. Stress concentration coefficients in the areas of heat treatment zones are determined.

Keywords: stresses, elastic modulus, Poisson's ratio, concentration coefficient, stress-strain state.

Получено 05.10.2023.