## Глава 29. НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ПОСЛЕ ТЕРМООБРАБОТКИ ДВИЖУЩИМСЯ ИСТОЧНИКОМ НАГРЕВА

## Веремейчик А.И., Нерода М.В., Хвисевич В.М., Холодарь Б.Г.

УО «Брестский государственный технический университет», г. Брест, Беларусь

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 состояния 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 широко представлены литературных источниках данные ПО измерениям микротвердости поверхностной зоны материалов, ее износостойкости [5-8], но данные о механических свойствах материала в этих областях (модуль упругости, коэффициент Пуассона, пределы прочности и текучести) ограничены, однозначных аналитических зависимостей между ними не существует, что вызывает неопределенность в их конкретных значениях 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 напряженнодеформированное состояние (НДС) деталей и возможных границах его изменения сравнительно со случаем отсутствия такого воздействия [9–13]. В настоящей работе представлены результаты исследований НДС обработанных образцов при их растяжении для случаев, когда сечение дорожки представляет собой прямоугольник, полукруг или сегмент круга различной высоты.

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 задачи о растяжении стержня с зоной обработанного материала (рисунок 1, а).



Рисунок 1 – Образец и выделенный элемент

Рассматриваются два случая длины дорожки – непрерывной по длине образца и укороченной для учета влияния ее торцевой области. При расчетах варьировались геометрия зон, число дорожек и расстояния между ними. Длина укороченного участка дорожки составляла 5/11 длины рассматриваемого участка стержня. При термообработке в зависимости от режимов толщина промежуточного слоя может

изменяться, поэтому расчеты проводились для различных значений этого параметра. Ввиду симметрии задачи при моделировании рассматривалась выделенная четверть образца.

Анализируются две формы зоны структурообразования – прямоугольного (0,8×0,4 мм) и сегментовидного сечения с зоной обработанного материала в виде полукруга радиусом 0,4 мм или сегмента. В качестве расчетного пакета для модели с прямоугольным сечением зоны использован программный комплекс MSC NASTRAN, для зоны с криволинейной границей – ANSYS Workbench.

Конечно-элементная модель образца при наличии одной дорожки показана на рисунке 2. Ввиду симметрии задачи при моделировании рассматривается выделенная четверть образца (рисунок 1, б).



Рисунок 2 – Конечно-элементные модели: а) прямоугольная, б) сегментовидная

Левый верхний угол занимает область обработанного материала, окруженного переходной зоной. Толщина обработанного материала варьировалась в пределах *h*=0,1÷0,4 мм, переходной зоны – *s*=0,05÷0,2 мм. Остальной объем занят исходным (основным) материалом. Габаритные размеры модели *a*×*b*×*c*=2,0×2,6×4,4 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 2-х 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  $E = E_{bas} = 200 \ \Gamma \Pi a$ , 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  $K_E = E_{pr}/E_{bas}$ ,  $K_{\mu} = \mu_{pr}/\mu_{bas}$  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. НДС материала далее представлено через эквивалентные напряжения по Мизесу  $\sigma_{3KB}$  и продольные напряжения  $\sigma_z$ .

Исследование влияния свойств материала зон прямоугольного и сегментовидного сечения на НДС. Проведено исследование НДС образцов с зонами измененной структуры материала прямоугольного и сегментовидного сечений для различных граничных условий, количества и размеров зон, характеристик материала.

На рисунке 3 приведено распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{_{3KB}}$  по объему тела для рассмотренных характеристик материала и условий, касающихся геометрии обработки. Сравнивая их, можно определить направление изменения НДС материала в зависимости от этих параметров. Расчетные значения напряжений являются средними в соответствующих элементах. Их величины в угловых точках элементов не используются, так как в виду малости размеров конечных элементов сравнительно с габаритными размерами тела максимальные значения в них достаточно близки к средним. Главные напряжения  $\sigma_1$  в данной задаче близки к продольным напряжениям  $\sigma_z$ , поэтому их уровни не выведены отдельно.



I – зона прямоугольной формы



а, г, ж, к)  $E_{bas} = 200$  ГПа;  $E_{int} = 250$  ГПа;  $E_{pr} = 300$  ГПа;  $\mu_{bas} = \mu_{int} = \mu_{pr} = 0,3$ б, д, з, л)  $E_{bas} = E_{int} = E_{pr} = 200$  ГПа;  $\mu_{bas} = 0,3$ ;  $\mu_{int} = 0,36$ ;  $\mu_{pr} = 0,42$ в, е, и, м)  $E_{bas} = E_{int} = E_{pr} = 200$  ГПа;  $\mu_{bas} = 0,3$ ;  $\mu_{int} = 0,24$ ;  $\mu_{pr} = 0,21$ 

Рисунок 3 – Распределение эквивалентных напряжений по критерию Мизеса при свободной (а–в, ж–и) и закрепленной (г–е, к–м) правой грани, толщина промежуточного слоя s=0,2 мм Результаты проведенных расчетов показывают, что любое отклонение от исходных параметров ведет к изменению распределения напряжений по объему. Их максимум может реализоваться как в обработанном слое, так и в основном материале, промежуточном слое или на границах слоев. Для укороченной зоны наибольшие напряжения возникают в области примыкания обработанного материала к основному. При возрастании модуля упругости обработанного слоя над модулем исходного материала всегда имеет место и возрастание максимальных напряжений  $\sigma_{_{3KB}}$  и  $\sigma_z$ , в то время как возникающие на границе переходной зоны и основного материала минимальные напряжения этой закономерности не подчиняются. При уменьшении модуля упругости обработанной к модулю упругости основного материала концентрация напряжений возникает в основном материале, вследствие чего максимальные напряжения близки к номинальным. Основное отличие для зон с криволинейной границей – максимум напряжений возникает на оси симметрии сегмента.

Установлено, что влияние коэффициента Пуассона на напряжения нелинейно. Его отклонение для обработанной зоны от коэффициента для исходного (основного) материала в любую сторону ведет к возрастанию максимальных напряжений, но поразному может сказаться на уровне минимальных. При изменении коэффициента Пуассона исходного материала построения на этих рисунках также определенным образом изменятся. Указанные замечания относительно влияния коэффициентов Пуассона соответствуют [14].

На рисунках 4–7 приведены значения коэффициентов концентрации напряжений  $K_{\sigma} = \frac{\sigma_z^{max}}{\sigma_N}$  как отношения максимальных продольных напряжений  $\sigma_z^{max}$  к значению номинальных продольных напряжений, соответствующему случаю  $K_E = K_{\mu} = 1$ , в зависимости от отношений  $K_E$  или  $K_{\mu}$ . Рисунки 4, 5 иллюстрируют случай прямоугольной формы зоны структурообразования, рисунки 6, 7 – формы полукруга. Светлые значки на рисунках 4, 5 относятся к случаю свободной правой грани  $U_x \neq 0$  (случай стержня), а темные – к случаю закрепленной грани  $U_x = 0$  (стесненное деформирование).



о ● длинная дорожка; □ ■ – укороченная дорожка; промежуточный слой толщиной 0,2 мм
 Рисунок 4 – Влияние модуля упругости (а) и коэффициента Пуассона (б) на продольные напряжения



, □ – свободная правая грань; •, ■ – закрепленная правая грань





Рисунок 6 – Зависимость коэффициента концентрации напряжений от *K<sub>E</sub>* (а) и *K<sub>µ</sub>* (б) для образца с дорожкой полукруглого сечения по всей длине



Рисунок 7 – Зависимость коэффициента концентрации напряжений от *K<sub>E</sub>* (а) и *K<sub>µ</sub>* (б) для образца с укороченной дорожкой полукруглого сечения

При стесненной деформации напряжения во всех рассмотренных случаях выше, чем при свободной. Коэффициенты концентрации напряжений для прямоугольной и полукруглой зон измененной структуры отличаются несущественно, причем значения для прямоугольной зоны выше.

Для схемы с укороченной дорожкой при обнулении толщины промежуточного слоя изменение коэффициента Пуассона относительно значения для исходного материала приводит к незначительному снижению концентрации напряжений.

Проведено определение НДС образцов с двумя параллельными дорожками сегментовидного сечения по всей длине при варьировании расстояния между ними и характеристик материала зон дорожек. На рисунке 8 приведена типичная зависимость коэффициента концентрации напряжений от характеристик материала зон измененной структуры при расстоянии между ними 0,4 мм.





Рисунок 8 – Зависимость коэффициента концентрации напряжений от *K<sub>E</sub>* (а) или *K<sub>µ</sub>* (б) для образца при расстоянии между дорожками 0,4 мм

Характер изменения коэффициента концентрации напряжений при варьировании механических характеристик обработанного слоя и промежуточной зоны для образца с двумя дорожками по всей длине аналогичен образцу с одной дорожкой по всей длине (рисунок 6).

Зависимости продольных напряжений от расстояния между зонами приведены на рисунке 9.

Результаты расчетов показали несущественное влияние расстояния между параллельными дорожками на продольные напряжения. Лишь при расстоянии  $\delta$ =0 для образца со свободной правой гранью с модулем упругости обработанной зоны на 10 % выше, чем у основного материала, наблюдается увеличение продольных напряжений на 3,5 МПа по сравнению с образцом, у которого  $\delta$ >0. На образцы со стесненной деформацией с модулем упругости обработанного материала, наблюдается материала выше, чем у основного материала, наблюдается увеличение продольных напряжений на 3,5 МПа по сравнению с образцом, у которого  $\delta$ >0. На образцы со стесненной деформацией с модулем упругости обработанного материала выше, чем у основного материала, изменение расстояния между зонами с измененной структурой материала не оказывает влияния на продольные напряжения.





Рисунок 9 – Зависимость продольных напряжений  $\sigma_z$  от расстояния между дорожками

Проведены исследования влияния расстояния между дорожками на продольные напряжения для различных коэффициентов Пуассона материала

обработанной зоны. Результаты показали изменение продольных напряжений в диапазоне расстояний 0,1...0,6 мм, не превышающее 0,5 %. Для всех образцов, кроме образца с модулем упругости обработанной зоны выше модуля упругости основного материала, находящегося в условиях стесненной деформации, при увеличении расстояния h от 0 до 0,1 мм продольные напряжения снижаются, причем наиболее значительно (почти на 4 МПа) – для образца с рассмотренными выше граничными условиями, для которого  $\mu_{pr} < \mu_{bas}$ .

Исследования влияния расстояния между дорожками на эквивалентные напряжения показали отсутствие влияния расстояния для образцов с  $E_{pr} > E_{bas}$  для обоих рассмотренных случаев граничных условий и незначительное влияние для других сочетаний механических характеристик зон. Следует отметить, что при стесненной деформации эквивалентные напряжения при увеличении  $\delta$  от 0 до 0,1 мм уменьшаются на 2–3 %, для свободного образца – растут на 2,5–4 %, на остальном диапазоне расстояния изменение не превышает доли процента.

Рассмотрен также случай наличия по всей длине образца трех параллельных дорожек прямоугольного сечения, расположенных симметрично на расстояниях δ=0–6 мм друг от друга. На рисунке 10 показано распределение эквивалентных напряжений по Мизесу для случая, когда расстояние между дорожками составляет 0,2 и 0 мм.







Результаты расчетов указывают на незначительное влияние расстояния  $\delta$  на напряженное состояние материала, что иллюстрируется рисунком 11, где показаны значения коэффициента концентрации продольных напряжений  $K_{\sigma}$ , который практически не отличается от его значений для одиночной дорожки. Объяснением этому факту служит то обстоятельство, что в данном случае максимум продольных напряжений  $\sigma_z$  и близких им главных напряжений  $\sigma_1$  возникает вблизи угловых точек сечения дорожки внутри тела детали. Таким образом, суждение о влиянии изменения механических и геометрических параметров материалов при воздействии высокоэнергетической струи на напряженно-деформированное состояние тела можно осуществить из рассмотрения результатов для одиночной дорожки.



Рисунок 11 – Зависимость коэффициента концентрации продольных напряжений *K*<sub>σ</sub> от расстояния δ между дорожками

Возникающие в процессе нагружения поперечные напряжения  $\sigma_x$  зависят от геометрических условий и от отличий в параметрах E и  $\mu$ , возрастая с ростом отношений  $E_{pr}/E_{bas}$  и  $\mu_{pr}/\mu_{bas}$ . Основную роль играет наличие стесненности деформаций. При ее отсутствии ( $U_x = var$ ) напряжения незначительны, изменяются от нуля до нескольких единиц МПа и могут возникать как в самом обработанном слое, так и под ним на границе с основным материалом. При наличии нескольких дорожек  $\sigma_x$  могут быть в обработанном слое как положительными ( $\mu_{pr}/\mu_{bas} > 1$ ) так и отрицательными ( $\mu_{pr}/\mu_{bas} < 1$ ) независимо от расстояния между дорожками. Их максимальный уровень в расчетах составил 3,82 МПа.

Если  $U_x = 0$ , то напряжения  $\sigma_x$  в обработанном слое растягивающие. При  $\mu_{pr}/\mu_{bas} < 1$  они несколько ниже уровня  $\sigma_z/3$ , но увеличиваются при  $\mu_{pr}/\mu_{bas} > 1$ , оставаясь ниже значения  $\sigma_z/2$ . В случае нескольких дорожек их максимум зависит от расстояния между ними ( $\delta = 0.2$  мм,  $\sigma_{max} = 11.82$  МПа при  $\sigma_z = 25.42$  МПа,  $\mu_{pr} = 0.42$ ).

Уровни поперечных напряжений  $\sigma_x$  для образцов с сегментовидной формой структурообразования как в качественном, так и в количественном отношении соответствуют случаю зоны прямоугольной формы и приведены на рисунке 12.



Рисунок 12 – Зависимость поперечных напряжений  $\sigma_x$  и их отношений к максимальным продольным напряжениям  $\sigma_z$  для случая полукруглой зоны при *E*=*var* (1) и  $\mu$ =*var* (2)

**Исследование влияния размеров зоны измененной структуры.** На рисунке 13 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 модуля упругости и коэффициента Пуассона.



) 
$$E_{bas} = 200 \text{ FTa}, E_{int} = 240 \text{ FTa}, E_{pr} = 280 \text{ FTa}, \mu_{bas} = \mu_{int} = \mu_{pr} = 0.3$$
  
B)  $E_{bas} = E_{int} = E_{pr} = 200 \text{ FTa}, \mu_{bas} = 0.3, \mu_{int} = 0.24, \mu_{pr} = 0.18$   
r)  $E_{bas} = E_{int} = E_{pr} = 200 \text{ FTa}, \mu_{bas} = 0.3, \mu_{int} = 0.36, \mu_{pr} = 0.42$ 

Рисунок 13 – Распределение эквивалентных напряжений в образце

На рисунках 14, 15 приведены зависимости наибольших эквивалентных напряжений в модели образца от  $K_{_E}$  и  $K_{_{\!H}}$ .



Рисунок 14 – Зависимость наибольших эквивалентных напряжений от  $K_{\scriptscriptstyle E}$ 



Рисунок 15 – Зависимость наибольших эквивалентных напряжений от К<sub>и</sub>

Расчеты показывают, что при варьировании размеров ядра h обработанного материала максимальные 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 практически не влияет на эквивалентные напряжения при варьировании модуля упругости (рисунок 14). С ростом  $K_E$  при  $K_E > 1$  эквивалентные напряжения  $\sigma_{
m _{3KB}}$  линейно возрастают. При свободной правой грани (рисунок 15, а) в диапазоне  $K_{\mu} = 0,6 \dots 1,0$  эквивалентные напряжения практически не изменяются (уменьшаются на 4 %), а для  $K_{\mu} > 1$ незначительно возрастают. При этом на всем диапазоне К<sub>и</sub> 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 (рисунок 15, б).

На рисунке 16 приведены зависимости коэффициента концентрации напряжений  $K_{\sigma} = \frac{\sigma_z^{max}}{\sigma_N}$  в зависимости от отношений  $K_E$  или  $K_{\mu}$  для случая закрепленной правой грани (в случае свободной правой грани различия между коэффициентами концентрации напряжений при варьировании  $K_E$  и  $K_{\mu}$  незначительны).



Рисунок 16 – Зависимость коэффициента концентрации напряжений от *K<sub>E</sub>* (а) и *K<sub>µ</sub>* (б) для случая стесненной деформации при *s*=0,2 мм

Исследовано влияние толщины промежуточного слоя на характер распределения напряженного состояния. Расчет проведен для различных толщин промежуточной зоны *s* и различных размеров ядра обработанного материала. Характер влияния толщины *h* однообразен и мало влияет на уровень напряжений. Результаты показывают, что при изменении  $K_E$  толщина промежуточного слоя *s* практически не влияет на уровень  $\sigma_{3\kappa B}$  и  $\sigma_z$ . образцов, а при изменении  $K_{\mu}$  зависимость эквивалентных напряжений от *s* более заметна и для различных соотношений коэффициентов Пуассона материалов зон показана на рисунках 17, 18.





Рисунок 17 – Зависимость эквивалентных напряжений от толщины промежуточного слоя при различных  $K_{\mu}$ ,  $E_{bas}=E_{int}=E_{pr}=200$  ГПа



в) *h*=0,4 мм

г) *h*=0,3 мм



Рисунок 18 – Зависимость продольных напряжений от толщины промежуточного слоя при различных  $K_{\mu}$ ,  $E_{bas} = E_{int} = E_{pr} = 200$  ГПа

Наибольшее влияние толщина промежуточного слоя оказывает на эквивалентные напряжения 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 при изменении размеров промежуточной зоны.

Более наглядно влияние изменения механических характеристик материала в зоне обработки высокоэнергетическими потоками может быть представлено через коэффициенты концентрации напряжений. На рисунке 19 показано влияние толщины промежуточного слоя *s* на коэффициенты концентрации напряжений при изменениях  $K_{\mu}$  для полукруглой формы сечения обработанной зоны (для сечений в форме сегмента она выражена в меньшей степени). Различие в модулях упругости практически не изменяет  $K_{\mu}$ 



Рисунок 19 – Зависимость коэффициента концентрации напряжений образца с полукруглым сечением от *К*<sub>µ</sub> для различных толщин промежуточного слоя



Рисунок 20 – Зависимость эквивалентных напряжений от *К*<sub>µ</sub> при различных значениях толщины промежуточного слоя

Как видно из рисунков 19, 20, 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  $0,6 \le K_{\mu} \le 1,0$  линейная, при  $K_{\mu} > 1,0$  графики имеют нелинейный характер.

На рисунке 21 показано распределение эквивалентных напряжений для дорожки прямоугольного сечения при толщинах ядра *h*=0.3 мм и *h*=0.1 мм.





a, г) 
$$E_{bas} = 200$$
 ГПа,  $E_{int} = 250$  ГПа,  $E_{pr} = 300$  ГПа,  $\mu_{bas} = \mu_{int} = \mu_{pr} = 0,320$   
б, д)  $E_{bas} = E_{int} = E_{pr} = 200$  ГПа,  $\mu_{bas} = 0,3$ ,  $\mu_{int} = 0,36$ ,  $\mu_{pr} = 0,42$   
в, е)  $E_{bas} = E_{int} = E_{pr} = 200$  ГПа,  $\mu_{bas} = 0,3$ ,  $\mu_{int} = 0,24$ ,  $\mu_{pr} = 0,21$ 

Рисунок 21 – Распределение эквивалентных напряжений по критерию Мизеса при свободной (а–в) и закрепленной (г–е) правой грани

Из рисунка 21 видно, что максимальные напряжения могут возникать во всех трех зонах материала. Изменение модуля упругости зоны ядра *E*<sub>pr</sub> ведет к пропорциональному изменению максимальных напряжений.

На рисунках 22, 23 показаны графики коэффициентов концентрации продольных напряжений при варьировании модуля упругости и коэффициента Пуассона для различных толщин ядра прямоугольной формы.



а) свободная правая грань; б) закрепленная правая грань

Рисунок 22 – Влияние модуля упругости на продольные напряжения,  $K_E = E_{pr}/E_{bas},$  $K_{\mu} = \mu_{pr}/\mu_{bas}$ 



Рисунок 23 – Влияние коэффициента Пуассона на продольные напряжения,  $K_E = E_{pr}/E_{bas}$ ,  $K_\mu = \mu_{pr}/\mu_{bas}$ 

Из графиков наглядно видно, что НДС зависит от глубины проникновения зон трансформированной структуры внутрь образца и от характера изменения основных механических характеристик материала, что естественно соответствует физическому смыслу рассматриваемого вопроса, а также от направления изменения этих величин в большую или меньшую сторону.

Заключение. В широком диапазоне размеров и механических характеристик материала проведены исследования напряженно-деформированного состояния образцов с зонами с трансформированной структурой материала при растяжении. Построено 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 и 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  $K_{\mu}$ , 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 коэффициентов концентрации при  $K_{\mu} < 1$  и  $K_{\mu} > 1$  можно объяснить увеличением сдвиговой жесткости при уменьшении коэффициента Пуассона. Поэтому при малых значениях  $\mu$  обработанной зоны сравнительно с  $\mu$  основного материала эффекты проявления сдвиговых деформаций уменьшаются и 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, 13–15], 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.

## ЛИТЕРАТУРА

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

2. Иванциевский, В. В. Управление структурным и напряженным состоянием поверхностных слоев деталей машин при их упрочнении с использованием концентрированных источников нагрева и финишного шлифования: дис. ... докт. техн. наук: 05.16.09 / В. В. Иванциевский. – 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 // Вісн. Приазов. держ. техн. унту. – 2004. – Вип. 14. – С. 223–226.

4. Мищирук, О. М. Влияние режимов лазерной закалки на свойства стали 40Х13 / О. М. Мищирук [и др.] // Вес. Нац. акад. Наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. 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 1353(1): 012065 (2019). DOI:10.1088/1742-6596/1353/1/012065

6. Шарапова, Д. М. Эволюция структуры и свойств конструкционных низколегированных сталей при кратковременных локальных термических воздействиях концентрированными источниками тепла : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.09 / Д. М. Шарапова. – Санкт-Петербург, 2018. – 140 с.

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

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

9. Verameichyk AI, Neroda MV, Holodar BG. The influence of the altered structure zone characteristics after the material jet treatment on the samples stress state during tensility. Materials Physics and Mechanics. 2023;51(4): 130-141. DOI: 10.18149/MPM.5132023\_12.

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 / Белорус. гос. ун-т транспорта. – Гомель, 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 международного симпозиума, Минск, 21 – 25 августа 2023 г. / под. ред. В. В. Рубаника. – Минск : ИВЦ Минфина, 2023. – С. 282–284.

12. Расчеты на прочность в машиностроении / под ред. С. Д. Пономарева. – Том I. – 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, – М. : «Наука и технологии», 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. научно-техн. конф., Брест, 30–31 марта 2017 г. – Брест, 2017. – С.169–174.

15. Мусхелишвили, Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н. И. Мусхелишвили. – М. : Наука, Главн. ред. физ.-мат.лит., 1966. – 708 с.

16. Веремейчик, А. И. Исследование влияния глубины закаленной зоны образца на его напряженно-деформированное состояние / А. И. Веремейчик, Б. Г. Холодарь, М. В. Мазырка // Фундаментальные основы механики. – Санкт-Петербург: НИЦ МС, 2023. – № 12. – С. 113–116. <u>https://doi.org/10.26160/2542-0127-2023-12-113-116</u>.