

УДК 539.3:004.94

А. И. ВЕРЕМЕЙЧИК

Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ОБРАЗЦОВ С СЕРПОВИДНЫМИ ЗОНАМИ ИЗМЕНЕННОЙ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА ПРИ ОСЕВОМ РАСТЯЖЕНИИ

В статье исследуется деформирование образцов с зонами измененной структуры материала, которые возникают после термообработки локальным высокоэнергетическим источником нагрева. Проведено компьютерное моделирование растяжения образцов с зонами серповидной формы по всей длине и на ее части. Исследовано влияние механических характеристик материала зон термообработки на напряженно-деформированное состояние. Рассмотрен случай двух параллельных зон для разных их размеров и расстояний между ними. Определены коэффициенты концентрации напряжений в окрестности термообработанных областей.

Ключевые слова: зона измененной структуры, напряженно-деформированное состояние, коэффициент концентрации напряжений, модуль упругости, коэффициент Пуассона.

Введение. Известно, что использование лазерного, плазменного и других высокоэнергетических методов термообработки позволяет улучшить многие эксплуатационные показатели: механические характеристики, износостойкость, теплостойкость, коррозионную стойкость, уменьшить остаточные напряжения в упрочненном слое и др. Упрочнение металла при закалке без оплавления в этих случаях сопровождается возникновением областей с измененной структурой исходного материала – зоны целевого воздействия и окружающей ее зоны термического влияния (зоны отпуска). Они на практике представляют собой «дорожку», возникающую после воздействия на образец движущимся лазером или плазменной струей (дугой), и влияют на локальное напряженно-деформированное состояние (НДС) материала в своей окрестности [1–4]. Такое влияние можно охарактеризовать либо коэффициентами концентрации напряжений, либо параметрами, используемыми в механике разрушения, например, коэффициентами интенсивности напряжений. Имеются соответствующие аналитические и численные решения, приведенные, например, в [4–9].

При поверхностной закалке в деталях протекают сложные изменения фазового и структурного состояния металла ввиду локального и неравномерного нагрева. Высокие скорости подвода энергии 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 участкам зоны термического влия-

ния [10]. Результаты исследований [11–14] показывают, что структура металла в зоне термического влияния заметно отличается как от структуры зоны обработки, так и от структуры основного материала, а управление ее свойствами ограничено в связи с отсутствием возможности непосредственного сопутствующего воздействия на структурообразование в этой области. Данные о свойствах материала в указанных местах ограничены, что является существенным недостатком при прогнозировании поведения термообработанного объекта в разнообразных условиях его эксплуатации. Наиболее важными механическими характеристиками материала являются модуль упругости, коэффициент Пуассона, пределы прочности и текучести. Однозначных аналитических зависимостей, определяющих связи между ними, не существует, поэтому после сосредоточенной высокоэнергетической обработки материала имеется неопределенность в их значениях [4].

Исследованию НДС при воздействии на материалы локальных источников тепла посвящен ряд работ [11–20]. Например, в [11] разработана новая методика назначения режимов поверхностной закалки с использованием концентрированных источников энергии, отличающаяся от известных тем, что режимы термообработки устанавливаются с учетом не только задаваемой глубины и твердости упрочненного слоя, но и характера распределения остаточных напряжений по глубине материала. В работе [12] выполнен анализ влияния технологических особенностей кратковременных локальных термических воздействий на характер структурных изменений и степень деградации свойств машиностроительных материалов, установлены закономерности и взаимосвязи между технологическими факторами, определяющими особенности кратковременных локальных термических воздействий на исследуемые стали и характером структурных изменений и их свойств. В статье [13] создана математическая модель для определения НДС элементов составных конструкций при воздействии локального источника нагрева. В работе [14] представлены результаты исследований влияния процесса лазерной обработки на микроструктуру и распределение элементов между различными структурными составляющими, а также на формирование зоны термического влияния. Исследование влияния режимов термообработки на структуру и механические характеристики стали пониженной прокаливаемости 60ПП проведено в [15]. В статье [16] изучено, к каким изменениям механических свойств и микроструктуры стали ST 37-2 приводит термическая обработка (отжиг, нормализация, закалка, отпуск) в электропечи.

Анализ литературных источников показывает, что проводимые отечественными и зарубежными учеными исследования в этой области направлены в основном на установление механических характеристик термообработанного материала, а проблемам, касающимся изучения иных свойств материала обработанной области, уделяется недостаточное внимание. Особенности структуры и свойств зоны термического влияния рассматриваются

в литературе, как правило, для сварных соединений [10, 17, 18]. Кроме того, имеется лишь незначительная информация об изменении механических характеристик зон материала после термообработки, возникающих при использовании высокоэнергетических методов сосредоточенного воздействия.

Результаты экспериментальных исследований и ряд работ, например [21], показали, что глубина поверхностной закалки невелика по сравнению с толщиной детали. В этом случае оценку влияния параметров материала с зонами измененной структуры целесообразно проводить при отсутствии градиентов напряжений, обеспечивая однородность НДС растянутого образца.

Постановка задачи. Для исследования влияния изменения модуля упругости и коэффициента Пуассона двух новообразованных после термообработки областей по сравнению с характеристиками основного материала проведено конечно-элементное моделирование растяжения образца с зоной обработанного материала, которая имеет сечение в форме полукруга [22], окруженной промежуточной серповидной зоной термического влияния (рисунок 1).

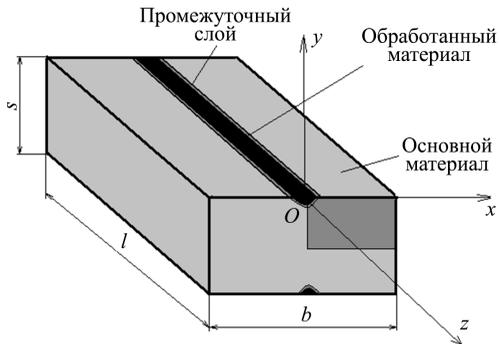


Рисунок 1 – Образец и выделенный элемент

Ввиду симметрии задачи при моделировании рассматривается выделенная четверть образца (рисунок 2). В качестве расчетного пакета использован программный комплекс *ANSYS Workbench 2019 R2*.

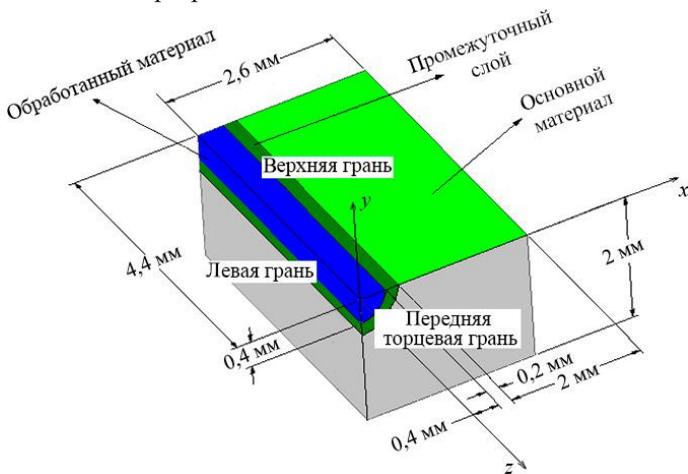


Рисунок 2 – Расчетная схема выделенной области

Левый верхний угол радиусом 0,4 мм занимает область обработанного материала. Этот объем окружен переходной зоной толщиной 0,2 мм. Все остальное пространство занято исходным (основным) материалом. Габаритные размеры модели 2,0×2,6×4,4 мм. Средствами программного обеспечения задавалась автоматическая генерация сетки параллелепипедами, а там, где это оказалось невозможным, – трехгранными призмами.

Длина зон измененной структуры принята равной длине образца (рисунок 3, а) или ее половине (рисунок 3, б).

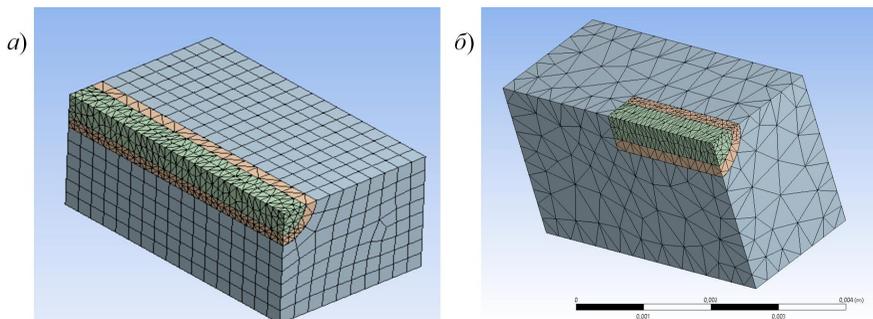


Рисунок 3 – Конечно-элементная модель части образца

Граничные условия задавались в виде ограничения перемещений: в направлении оси Oy ($v_y = 0$) – для точек верхней и нижней граней тела, по оси Oz ($w_z = 0$) – для задней торцевой грани, по Ox ($u_x = 0$) – для левой грани.

Для правой продольной грани задавались граничные условия двух видов:

- 1) $u_x \neq 0$ – имитация стержневого образца;
- 2) $u_x = 0$ – имитация стесненной деформации.

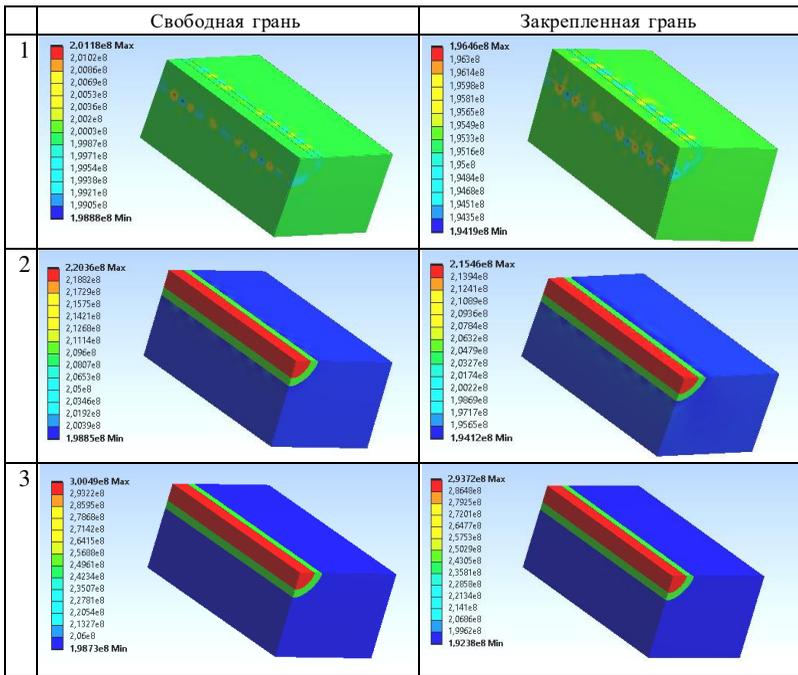
Принято, что модуль упругости исходного материала $E = E_{bas} = 200$ ГПа, коэффициент Пуассона $\mu = \mu_{bas} = 0,3$. Модули упругости промежуточного E_{int} и обработанного E_{pr} слоев и их коэффициенты Пуассона μ_{int} , μ_{pr} варьировались, но считалось, что после обработки материал тела во всех его точках сохраняет упругие свойства и имеет одинаковую температуру, что соответствует большинству реализующихся случаев эксплуатации деталей машин и механизмов. Тепловой режим принимался установившимся.

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. Проведенные расчеты показали, что выбранная длина стержня достаточна для выравнивания напряженного состояния по объему и позволяет пренебречь влиянием на него условий на границах.

Результаты исследования НДС для образцов с одной дорожкой. Расчет моделей образцов с двумя зонами измененной структуры проводился

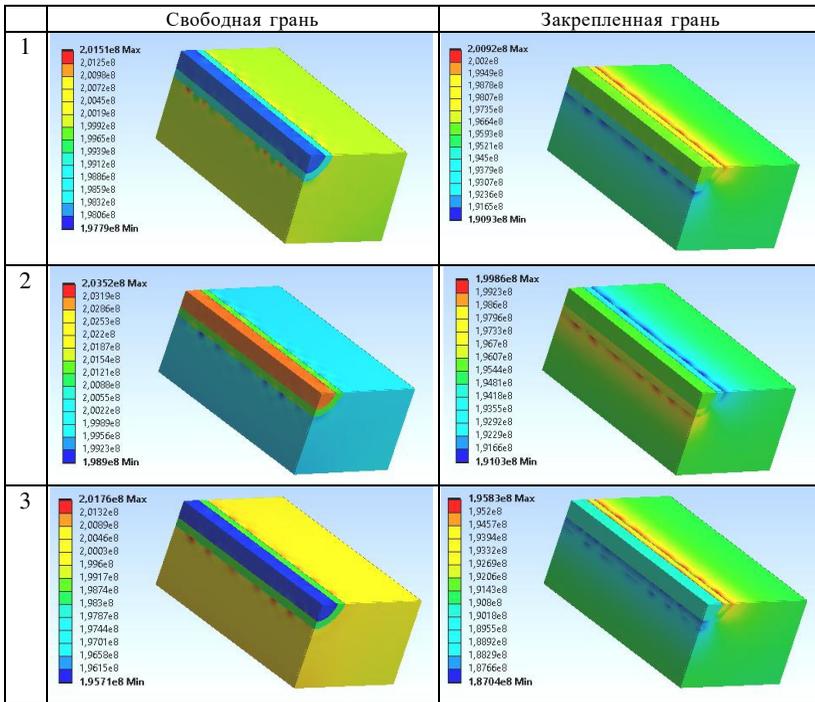
для отношений модулей упругости и коэффициентов Пуассона обработанного материала к аналогичным характеристикам исходного, находящихся в пределах $K_E = E_{pr} / E_{bas} = 0,5 \dots 1,5$; $K_\mu = \mu_{pr} / \mu_{bas} = 0,6 \dots 1,5$ соответственно. На рисунках 4, 5 и в таблице 1 приведены эквивалентные по Мизесу $\sigma_{экв}$ и продольные σ_z напряжения в объеме материала для разных характеристик зон материала образцов, что позволяет определить влияние этих параметров на изменение НДС материала.

Представлены средние величины напряжений в соответствующих элементах, которые незначительно отличаются от максимальных, наблюдаемых в угловых точках, поскольку размеры конечных элементов малы по сравнению с габаритными размерами тела. Главные напряжения σ_1 близки к продольным σ_z , поэтому их уровни не выведены отдельно. Отметим, что приведенные в одной строке таблицы 1 минимальные и максимальные значения эквивалентных по Мизесу и продольных напряжений относятся к разным зонам.



- 1) $E_{bas} = 200$ ГПа, $E_{int} = 200$ ГПа, $E_{pr} = 200$ ГПа; $E_{bas} = 200$ ГПа, $E_{int} = 210$ ГПа, $E_{pr} = 220$ ГПа;
 2) $E_{bas} = 200$ ГПа, $E_{int} = 250$ ГПа, $E_{pr} = 300$ ГПа

Рисунок 4 – Распределение эквивалентных по Мизесу напряжений $\sigma_{экв}$ в образце, толщина промежуточного слоя, 0,2 мм, $\mu_{bas} = \mu_{int} = \mu_{pr} = 0,3$



1) $\mu_{bas} = 0,3$, $\mu_{int} = 0,33$, $\mu_{pr} = 0,36$; 2) $\mu_{bas} = 0,3$, $\mu_{int} = 0,27$, $\mu_{pr} = 0,24$; 3) $\mu_{bas} = 0,21$, $\mu_{int} = 0,24$, $\mu_{pr} = 0,3$

Рисунок 5 – Распределение эквивалентных по Мизесу напряжений $\sigma_{эkv}$ в образце при толщине промежуточного слоя 0,2 мм и $E_{bas} = E_{int} = E_{pr} = 200$ ГПа

Таблица 1 – Напряжения при структуре материала, измененной на половине длины

Модуль упругости, ГПа			Коэффициент Пуассона			Правая грань свободна ($u_x \neq 0$)		Правая грань закреплена ($u_x = 0$)	
E_{bas}	E_{int}	E_{pr}	μ_{bas}	μ_{int}	μ_{pr}	Эквивалентные по Мизесу напряжения, МПа $\sigma_{эkv}^{min} / \sigma_{эkv}^{max}$	Продольные напряжения, МПа $\sigma_z^{min} / \sigma_z^{max}$	Эквивалентные по Мизесу напряжения, МПа $\sigma_{эkv}^{min} / \sigma_{эkv}^{max}$	Продольные напряжения, МПа $\sigma_z^{min} / \sigma_z^{max}$
200	200	200	0,30	0,30	0,30	181,58/208,86	176,49/214,16	173,42/247,69	193,04/245,02
200	210	220	0,30	0,30	0,30	190,41/218,80	184,35/219,33	178,96/248,03	201,00/250,77
200	220	240	0,30	0,30	0,30	193,11/237,09	192,21/237,51	182,39/257,89	209,09/269,45
200	250	300	0,30	0,30	0,30	184,82/290,65	182,45/291,64	181,40/312,87	203,20/326,39
200	200	200	0,30	0,33	0,36	179,39/213,74	178,52/215,34	176,27/263,67	197,66/255,99
200	200	200	0,30	0,36	0,42	175,75/230,13	181,10/233,82	164,08/281,54	196,96/276,40
200	200	200	0,30	0,27	0,24	184,16/210,68	174,88/213,26	171,09/233,64	189,08/235,90
200	200	200	0,30	0,24	0,21	182,24/215,89	173,86/212,66	169,21/230,70	185,18/236,73
200	200	200	0,21	0,24	0,30	178,97/219,00	180,06/214,64	168,98/251,26	189,58/231,09

Результаты исследований показали, что любое изменение характеристик материала обработанной и промежуточной зон по отношению к основному материалу приводит к изменению НДС образцов. Максимальные напряжения возникают как в обработанном слое, так и в основном материале или промежуточной зоне. При $E_{pr} > E_{bas}$ возрастают максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу $\sigma_{эKB}$ и продольные напряжения σ_z , в то время как возникающие на границе переходной зоны и основного материала или в основном материале минимальные значения $\sigma_{эKB}$ и σ_z этой закономерности не подчиняются.

Исследование влияния характеристик обработанной и промежуточной зон на коэффициент концентрации напряжений. Результаты расчетов показали, что отклонение коэффициента Пуассона обработанной зоны от коэффициента μ для основного материала в любую сторону ведет к возрастанию максимальных напряжений, но по-разному может сказаться на уровне минимальных. На рисунках 6, 7 приведены значения отношений σ_z^{\max} к фиксированному значению $\sigma_N = 200$ МПа, которые представляют собой коэффициенты концентрации напряжений для данной задачи $K_\sigma = \sigma_z^{\max} / \sigma_N$, в зависимости от отношений K_E или K_μ . При расчетах принималось $\mu_{int} = (\mu_{bas} + \mu_{pr}) / 2$.

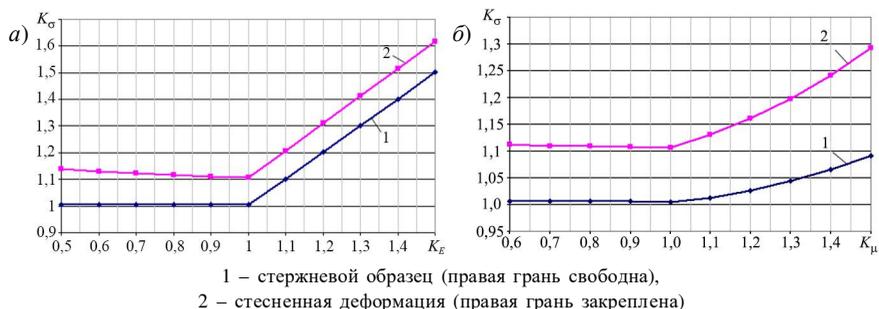


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента концентрации напряжений от соотношений K_E (a) или K_μ (б) для образца с зонами измененной структуры по всей длине

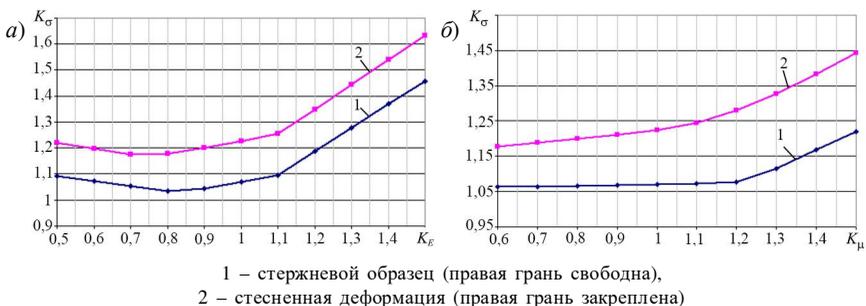
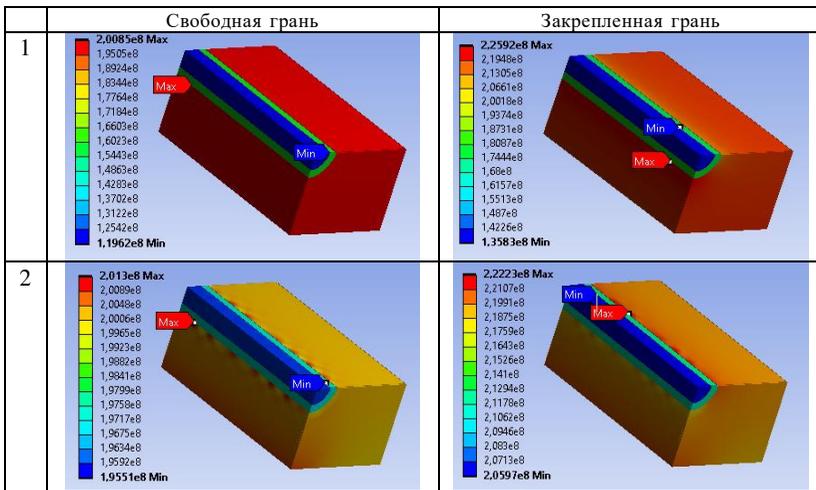


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента концентрации напряжений от K_E (a) или K_μ (б) для образца с зонами измененной структуры на половине длины

Графики показывают, что в случае наличия дорожки по всей длине образца для материала с $E_{pr} < E_{bas}$ при стесненной деформации (см. рисунок 6, а, кривая 2) коэффициент концентрации напряжений медленно снижается до величины $K_\sigma = 1,1058$, затем линейно возрастает с ростом модуля упругости обработанной зоны. В случае стержневого образца (см. рисунок 6, а, кривая 1) коэффициент концентрации напряжений на интервале $0,5 \leq K_E \leq 1$ медленно возрастает (на 0,9 %), при $1 \leq K_E \leq 1,5$ растет линейно аналогично росту коэффициента для образца со стесненной деформацией, при этом значения K_σ ниже случая стесненной деформации на 10,1–11,6 %. Небольшое изменение коэффициента K_σ при $0,5 \leq K_E \leq 1$ связано с тем, что концентрация напряжений для образца, у которого модуль упругости основного материала меньше модуля упругости обработанного, в соответствии с законом Гука находится в пределах основного материала (рисунок 8).



$$1 - E_{bas} = 200 \text{ ГПа}, E_{int} = 160 \text{ ГПа}, E_{pr} = 120 \text{ ГПа}, \mu_{bas} = \mu_{int} = \mu_{pr} = 0,3;$$

$$2 - E_{bas} = E_{int} = E_{pr} = 200 \text{ МПа}, \mu_{bas} = 0,3, \mu_{int} = 0,24, \mu_{pr} = 0,18.$$

Рисунок 8 – Распределение нормальных напряжений σ_z в образце при свободной и закрепленной правой грани, толщина промежуточного слоя 0,2 мм

Коэффициенты концентрации напряжений при варьировании коэффициента Пуассона ведут себя аналогично для случаев стесненной деформации и стержневого образца: при $K_\mu \leq 1$ уменьшаются до величин 1,11 и 1,01 соответственно (см. рисунок 6, б), затем нелинейно растут, причем при стесненной деформации рост коэффициента концентрации более стремителен, чем при стержневом образце, и при $K_\mu = 1,5$ максимальные продольные напряжения превышают номинальные на 29,3 %.

Коэффициент K_σ при наличии зон с измененными свойствами материала на половине длины образца в исследуемом диапазоне значений E сначала умень-

шается при увеличении K_E от 0,5 до 0,8, затем растет линейно в диапазоне $0,8 \leq K_E \leq 1,1$ на 6,1 и 7,6 % для случаев стержневого образца и стесненной деформации соответственно (см. рисунок 7, а). При $E_{pr} > 220$ МПа рост коэффициента концентрации напряжений на интервале $1,1 \leq K_E \leq 1,5$ составил 133 % для свободного стержня и 130 % для стесненной деформации.

При варьировании μ обработанной зоны в исследуемом диапазоне значений (см. рисунок 7, б) для образца со свободной правой гранью можно выделить два участка. На первом участке до значения $\mu_{pr} = 0,36$ коэффициент концентрации напряжений возрастает на 0,2–0,3 % при росте отношения μ_{pr} / μ_{bas} на 0,1. На втором участке в диапазоне $1,2 \leq K_\mu \leq 1,5$ коэффициент концентрации возрастает до величины, равной 1,22. В случае закрепленной правой грани при изменении коэффициента Пуассона коэффициент K_σ нелинейно растет.

Результаты расчетов показывают, что при стесненной деформации напряжения во всех рассмотренных случаях выше, чем при свободной.

Анализ поперечных напряжений при стесненной деформации образцов. Исследовано влияние механических характеристик на НДС образцов (рисунок 9). При увеличении K_E и K_μ от 0,6 до значений, соответствующих модулю упругости и коэффициенту Пуассона основного материала, поперечные напряжения уменьшаются до величины 68,16 МПа. Превышение модуля упругости и коэффициента Пуассона обрабатываемого материала значений для основного материала приводит к росту напряжений σ_x , причем изменение μ более существенно влияет на рост поперечных напряжений, чем изменение E .

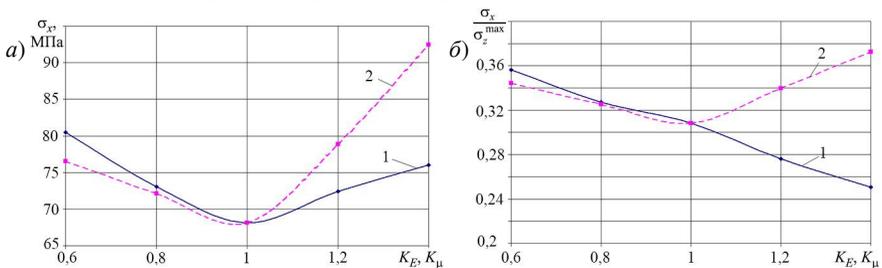
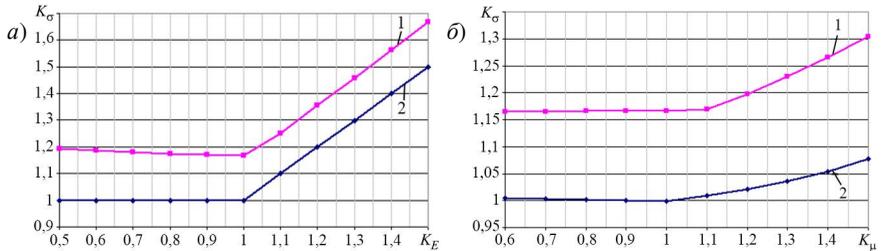


Рисунок 9 – Зависимость поперечных напряжений σ_x (а) и их отношений к максимальным продольным напряжениям σ_z^{\max} (б) при изменении K_E (1) и K_μ (2)

Установлено, что в исследуемом диапазоне параметров при стесненной деформации поперечные напряжения σ_x составляют 25–36 % от продольных при изменении модуля упругости и 30–37 % вследствие изменения коэффициента Пуассона (см. рисунок 9). Наибольшие значения отношения $\sigma_x / \sigma_z^{\max}$ при варьировании модуля упругости соответствуют минимальному соотношению E_{pr} / E_{bas} и при $E_{bas} = 200$ ГПа, $E_{int} = 150$ ГПа, $E_{pr} = 100$ ГПа составляют $\sigma_x / \sigma_z = 0,356$, а при увеличении K_E происходит снижение этого параметра. При увеличении K_μ до значения $K_\mu = 1$ отношения $\sigma_x / \sigma_z^{\max}$ уменьшаются. Дальнейший рост коэффициента Пуассона обработанной зоны приводит к увеличению доли поперечных напряжений.

В рассмотренном диапазоне параметров наибольшие поперечные напряжения возникают при минимальном модуле упругости материала обработанной зоны $E_{pr} = 100$ ГПа и составляют $\sigma_x = 85,09$ МПа, а также при максимальном коэффициенте Пуассона обработанного материала $\mu = 0,42$ (92,44 МПа).

Моделирование НДС образцов с двумя параллельными дорожками по всей длине. Анализировались влияние на НДС расстояния между дорожками и характеристик материала зон. Рассмотрены варианты увеличенных и уменьшенных значений коэффициента Пуассона и модуля упругости материала зон по сравнению с основным материалом. На рисунке 10 приведена типичная зависимость коэффициента концентрации напряжений от характеристик материала зон измененной структуры при расстоянии между ними 0,4 мм.

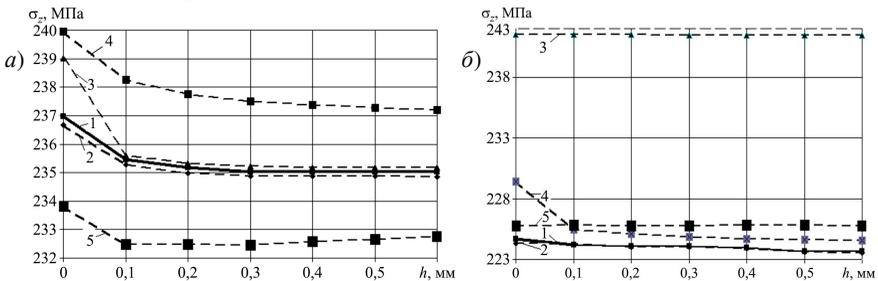


1 – стержневой образец (правая грань свободна);
2 – стесненная деформация (правая грань закреплена)

Рисунок 10 – Зависимость коэффициента концентрации напряжений:

а – от K_E ; б – от K_μ (для образца при расстоянии между дорожками 0,4 мм)

Характер изменения коэффициента концентрации напряжений при варьировании механических характеристик обработанного слоя и промежуточной зоны не отличается для образцов с двумя и одной дорожкой по всей длине (см. рисунок 6). Зависимости продольных напряжений от расстояния между зонами приведены на рисунке 11.



1 – $E_{bas} = E_{int} = E_{pr} = 200$ МПа, $\mu_{bas} = \mu_{int} = \mu_{pr} = 0,3$;
2 – $E_{bas} = 200$ ГПа, $E_{int} = 190$ ГПа, $E_{pr} = 180$ ГПа, $\mu_{bas} = \mu_{int} = \mu_{pr} = 0,3$;
3 – $E_{bas} = 200$ ГПа, $E_{int} = 210$ ГПа, $E_{pr} = 220$ ГПа, $\mu_{bas} = \mu_{int} = \mu_{pr} = 0,3$;
4 – $E_{bas} = E_{int} = E_{pr} = 200$ МПа, $\mu_{bas} = 0,3$, $\mu_{int} = 0,285$, $\mu_{pr} = 0,27$;
5 – $E_{bas} = E_{int} = E_{pr} = 200$ МПа, $\mu_{bas} = 0,3$, $\mu_{int} = 0,315$, $\mu_{pr} = 0,33$.

Рисунок 11 – Зависимость продольных напряжений σ_z от расстояния между дорожками: а – свободная правая грань; б – закреплённая правая грань

Результаты расчетов показали незначительное влияние расстояния между параллельными дорожками на продольные напряжения. Лишь при расстоянии $h = 0$ 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 $h > 0$. 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.

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) – у указанного здесь образца, для которого $\mu_{pr} < \mu_{bas}$.

Анализ изменения расстояния между дорожками на эквивалентные напряжения показал, что оно не влияет для образцов с $E_{pr} > E_{bas}$ при обоих рассмотренных случаях граничных условий и оказывает незначительное влияние для иных сочетаний механических характеристик зон. Следует отметить, что при стесненной деформации эквивалентные напряжения при увеличении d от 0 до 0,1 мм уменьшаются на 2–3 %, а для свободного образца – растут на 2,5–4 %. При больших расстояниях изменение не превышает доли процента.

Заключение. Проведено исследование влияния характеристик зон измененной структуры исходного материала, возникающих после термообработки образцов движущимся высококонцентрированным источником тепла (лазером, плазмотроном), на НДС при растяжении. Моделирование задачи о растяжении образца с двумя зонами измененной структуры серповидной формы проводилось с использованием конечно-элементного пакета *ANSYS Workbench*. По результатам конечно-элементного расчета для широкого диапазона значений модуля упругости и коэффициента Пуассона определено НДС образцов с одной или несколькими дорожками по всей его длине и на части длины. В случаях различных граничных условий, размеров зон и расстояний между ними определены коэффициенты концентрации напряжений в окрестности зон обработки. Установлено незначительное влияние расстояния между дорожками на коэффициент концентрации напряжений. Исследованы поперечные напряжения в зависимости от механических характеристик обработанного и основного материала.

Полученные значения коэффициентов концентрации, хотя и отражают общие тенденции трансформации НДС при наличии локальной обработки

материала, не являются однозначными, а зависят от геометрических и механических характеристик объекта (соотношений размеров обработанной зоны и исходной детали, толщин промежуточного слоя, модулей упругости и коэффициентов Пуассона материалов слоев). Результаты исследований показывают как важность знания точных значений механических характеристик материала в области локального воздействия, так и необходимость проведения расчетов на прочность заданной детали с учетом наличия этого воздействия, без чего невозможен выбор оптимального режима обработки, обеспечивающего требуемые эксплуатационные свойства упрочняемых деталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Мухелишвили, Н. И.** Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н. И. Мухелишвили. – М. : Наука, Глав. ред. физ.-мат. лит., 1966. – 708 с.
- 2 **Нейбер, Г.** Концентрация напряжений / Г. Нейбер ; пер. с нем. Н. Н. Лебедева ; под ред. проф. А. И. Лурье. – М.–Л. : Гостехиздат, 1947. – 204 с.
- 3 Исследование влияния механических характеристик зон термообработанного материала при растяжении / А. И. Веремейчик [и др.] // Актуальные проблемы прочности : материалы Междунар. науч. конф., г. Минск, 23–27 мая 2022 г. – Минск : УП «ИВЦ Минфина», 2022. – С. 262–264.
- 4 **Савин, Г. Н.** Концентрация напряжений около отверстий / Г. Н. Савин. – М.–Л. : Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1951. – 496 с.
- 5 Прочность, устойчивость, колебания : справ. В 3 т. Т. 2 / под ред. И. А. Биргера, Я. Г. Пановко. – М. : Машиностроение, 1968. – 463 с.
- 6 **Петерсон, Р.** Коэффициенты концентрации напряжений. Графики и формулы для расчета конструктивных элементов на прочность / Р. Петерсон ; пер. с англ. И. А. Нечай, И. П. Сухарева, Б. Н. Ушакова. – М. : Мир, 1977. – 302 с.
- 7 Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений. В 2 т. / Ю. Ито [и др.] ; под ред. Ю. Мураками ; пер. с англ. В. И. Даниленко. – М. : Мир, 1990. – Т. 1 – 447 с.; Т. 2 – 453 с.
- 8 **Черепанов, Г. П.** Механика хрупкого разрушения / Г. П. Черепанов. – М. : Наука, 1974. – 640 с.
- 9 **Бережницкий, Л. Т.** Изгиб тонких пластин с дефектами типа трещин / Л. Т. Бережницкий, М. В. Делявский, В. В. Панасюк. – Киев : Наук. думка, 1979. – 400 с.
- 10 **Шекшеев, М. А.** Особенности структуры и свойства зоны термического влияния сварных соединений сталей класса прочности К56 : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.01 / М. А. Шекшеев. – Магнитогорск, 2013. – 18 с.
- 11 **Иванциевский, 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. Иванциевский. – Новосибирск, 2012. – 425 с.
- 12 **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. – СПб., 2018. – 140 с.
- 13 **Гулаков, С. В.** Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния элементов составных конструкций при воздействии локального ис-

точника нагрєва / С. В. Гулаков, С. В. Щєрбаков, Н. Г. Заварика // Вїсник Приазовського державного технїчного унїверситету. – 2004. – Вип. 14. – С. 223–226.

14 **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.

15 Влияние режимов нагрєва на структуру и механические свойства стали 60ПП / А. И. Гордиенко [и др.] // Литье и металлургия. – 2011. – № 1. – С. 146–153.

16 **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 and Materials Characterization and Engineering. – 2011. – Vol. 10, no. 3. – P. 299–308.

17 Структура та властивостї металу зони термїчного впливу зварних з'єднань високомїцних спеціальних сталей / Г. М. Григоренко [и др.] // Металознавство та обробка металїв. – 2018. – № 4. – С. 27–34.

18 Structure and properties of weld joints in X80, X90, and K70 pipe steel / A. Yu. Ivanov [et al.] // Steel in Translation. – 2011. – Vol. 41, no. 7. – P. 611–616.

19 The Influence of the Highly Concentrated Energy Treatments on the Structure and Properties of Medium Carbon Steel / S. N. Grigoriev [et al.] // Metals. – 2020. – Vol. 10, is. 12. – Paper 1669. – 15 p.

20 **Dinesh Babu, P.** Laser surface hardening: a review / P. Dinesh Babu, K. R. Balasubramanian, G. H. Buvanashakaran // International Journal of Surface Science and Engineering. – 2011. – Vol. 5, no. 2–3. – P. 131–151.

21 **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.

22 **Лахтин, Ю. М.** Материаловедение / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1990. – 528 с.

A. I. VERAMEICHYK

Brest State Technical University, Brest, Belarus

STRESS-STRAIN STATE OF SAMPLES WITH SICKLE-SHAPED ZONES OF CHANGED MATERIAL STRUCTURE UNDER AXIAL TENSION

In the paper there is investigated the stress-strain state of samples with zones of changed material structure that arise after a heat treatment by a local high-energy heating source. There is performed the computer simulation of the stretching problem for the samples with sickle-shaped zones along the entire length and on the part of the length. The influence of the material mechanical characteristics of the zones under the heat treatment on the stress-strain state is investigated. The case of two parallel zones for their different values and the distance between them is analyzed. Stress concentration coefficients in the area of the thermo treated zones are determined.

Keywords: zone of changed structure, stress-strain state, stress concentration coefficient, elasticity modulus, Poisson's ratio.

Получено 22.08.2022