

УДК 004.94:620.172

А.И. ВЕРЕМЕЙЧИК, канд. физ.-мат. наук, доц.
старший научный сотрудник испытательного центра¹
E-mail: vai_mrtm@bstu.by

М.В. НЕРОДА, канд. техн. наук, доц.
первый проректор¹
E-mail: nerodamv@mail.ru

Б.Г. ХОЛОДАРЬ, канд. техн. наук, доц.
старший научный сотрудник научно-исследовательской части¹
E-mail: hbg@list.ru

¹Брестский государственный технический университет, г. Брест, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 19.04.2022.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ О РАСТЯЖЕНИИ МАТЕРИАЛА С ЗОНАМИ ИЗМЕНЕННОЙ СТРУКТУРЫ

Рассматривается компьютерное моделирование испытаний на растяжение стержня прямоугольного поперечного сечения с зонами, возникшими при термообработке движущимся высококонцентрированным источником тепла, характеристики которых отличаются от свойств основного материала. По результатам конечно-элементного моделирования исследовано напряженно-деформированное состояние стержня с одной или несколькими зонами измененной структуры по всей его длине и на части длины. Определены коэффициенты концентрации напряжений в окрестности зон обработки.

Ключевые слова: механические характеристики материала, коэффициент концентрации напряжений, метод конечных элементов, локальное воздействие, структура материала, интенсивность напряжений

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-3-60-77-84>

Введение. Известно, что различного рода включения, возникшие некоторым образом в однородном теле, влияют на локальное напряженно-деформированное состояние (НДС) материала в своей окрестности [1–3]. Это влияние можно охарактеризовать либо через коэффициенты концентрации напряжений, либо через параметры, используемые в механике разрушения, например коэффициенты интенсивности напряжений. Имеются аналитические и численные решения, в том числе приведенные в соответствующей литературе [3–8].

Исследованию НДС при воздействии на материалы локальных источников тепла посвящен ряд работ [9–12]. Например, в [10] 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 [11] установлены закономерности и взаимосвязи между технологическими фактора-

ми, определяющими особенности кратковременных локальных термических воздействий на материал, и характером структурных изменений и свойств машиностроительных материалов. В статье [12] создана математическая модель расчета напряженно-деформированного состояния элементов составных конструкций при воздействии локального источника нагрева. Анализ литературных источников показывает, что в настоящее время недостаточно представлены результаты исследований влияния различий механических характеристик материала после термообработки, которые могут возникнуть при различных высокоэнергетических методах сосредоточенного воздействия.

При лазерной, плазменной и других высокоэнергетических методах сосредоточенного воздействия на деталь возникают зоны измененной структуры исходного материала — зона целевого воздействия и окружающая ее зона термического влияния [13]. В последней структура заметно отличается как от структуры зоны обработки, так и от структуры основного материала, и управление ее свойствами ограничено в связи с отсутстви-

ем возможности непосредственного сопутствующего воздействия на структурообразование в этой области. Данные о свойствах материала в этих областях ограничены, что является существенным недостатком при прогнозировании поведения обработанного объекта в разнообразных условиях его эксплуатации.

Наиболее важными параметрами материала, определяющими его прочностные свойства, являются модули упругости, коэффициенты Пуассона, пределы прочности и текучести и располагаемая пластичность. Однозначных аналитических зависимостей между ними не существует, поэтому после сосредоточенной высокоэнергетической обработки материала имеет место большая неопределенность в их значениях [14].

Поскольку глубина такой обработки невелика сравнительно с толщиной детали [15], то наиболее естественно проводить оценку влияния параметров материала при отсутствии градиентов напряжений, например при однородном напряженно-деформированном состоянии растянутого образца.

Постановка задачи. Чтобы оценить степень влияния различий модуля упругости и коэффициента Пуассона двух новообразованных зон детали сравнительно с характеристиками основного материала, было проведено конечно-элементное моделирование задачи о растяжении стержня с дорожкой обработанного материала, окруженного промежуточной зоной термического влияния. Длина дорожки либо равна длине стержня, либо укорочена для учета влияния ее торцевой области. Кроме того, при проведении расчетов изменялась толщина промежуточного слоя. Ввиду симметрии задачи при моделировании достаточно рассматривать выделенную четвертинку образца (рисунок 1). Длина укороченного участка дорожки составляла $5/11$ длины выделенного участка стержня.

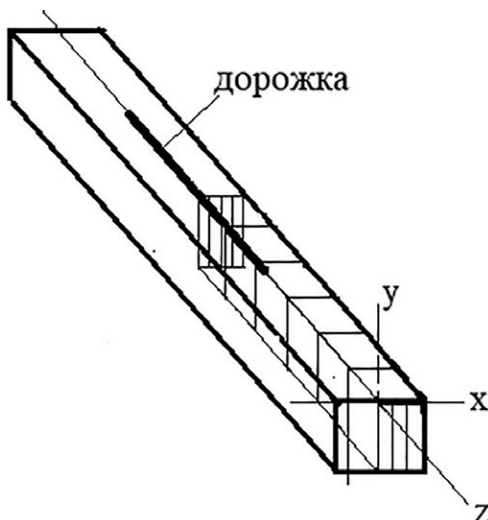


Рисунок 1 — Образец и выделенный элемент
Figure 1 — Sample and selected element

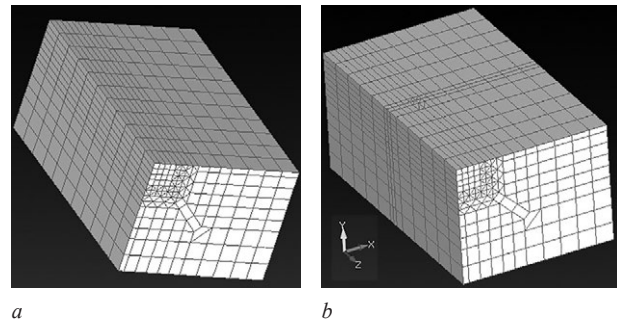


Рисунок 2 — Геометрическое представление конечно-элементной модели: *a* — дорожка по всей длине; *b* — дорожка на части длины

Figure 2 — Geometric representation of a finite element model: *a* — track along the entire length; *b* — track on a part of the length

Конечно-элементная модель задачи показана на рисунке 2. Левый верхний угол размером $0,4 \times 0,4$ мм занимает область обработанного материала. Этот объем всесторонне окружен переходной областью толщиной $0,2$ мм с возможностью ее уменьшения до нуля. Весь остальной объем занят исходным (основным) материалом. Габаритные размеры модели $2,0 \times 2,6 \times 4,4$ мм.

Граничные условия по перемещениям задавались в виде $V_y = 0$ по верхней грани тела, $W_z = 0$ по задней торцевой грани, $U_x = 0$ по левой грани. На правой продольной грани условия либо не задавались ($U_x \neq 0$, имитация стержневого образца), либо задавалось условие $U_x = 0$ для имитации стесненной деформации, например, в пластинах. Модуль упругости исходного материала $E = 200$ ГПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$. 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 и одинаковой температуре, что соответствует большинству реализующихся случаев эксплуатации деталей и конструкций. Напряженное состояние тела непосредственно в процессе его охлаждения после обработки не рассматривалось. Нагружение осуществлялось путем задания перемещения торцевого сечения на заданную величину $W_z = 0,0044$ мм, что соответствует напряжениям $\sigma_z = 200$ МПа для однородного стержня. Расчеты показали, что выбранная длина стержня достаточна для выравнивания напряженного состояния по его объему. Отношение модулей упругости обработанного материала к модулю исходного варьировалось в пределах $1,0$ – $1,5$, коэффициентов Пуассона соответственно в пределах $0,7$ – $1,4$. В качестве расчетного пакета использован программный комплекс MSC NASTRAN.

Основные результаты. Результаты расчетов сведены в таблицах 1–3 и для большей наглядности иллюстрируются рисунками 3–5. Индексы в таблицах «bas», «int», «rg» относятся соответственно к исходному материалу, промежуточному слою и обработанному объему.

Величины напряжений являются средними в соответствующих элементах. Их значения в угловых точках элементов здесь не используются, так как в виду малости размеров конечных элементов сравнительно с габаритными размера-

ми тела максимальные значения в них достаточно близки к средним. Главные напряжения σ_1 в данной задаче близки к продольным напряжениям σ_z , поэтому их уровни не выведены отдельно. Приведенные в таблицах в одной строчке минимальные

Таблица 1 — Результаты расчета для случая обработанного слоя по всей длине и толщине промежуточного слоя 0,2 мм
Table 1 — Calculation results for the case of the treated layer over the entire length and thickness of the intermediate layer of 0.2 mm

№	Модуль упругости E , ГПа			Коэффициент Пуассона μ			Интенсивность напряжений σ_i $\sigma_i^{\min} / \sigma_i^{\max}$	Продольные напряжения σ_z $\sigma_z^{\min} / \sigma_z^{\max}$	Интенсивность напряжений σ_i $\sigma_i^{\min} / \sigma_i^{\max}$	Продольные напряжения σ_z $\sigma_z^{\min} / \sigma_z^{\max}$
	E_{bas}	E_{int}	E_{pr}	μ_{bas}	μ_{int}	μ_{pr}				
1	200	200	200	0,30	0,30	0,30	200,0 / 200,0	200,0 / 200,0	195,3 / 195,3	219,8 / 219,8
2	200	210	220	0,30	0,30	0,30	20,00 / 220,0	200,0 / 220,0	195,5 / 235,3	220,9 / 265,3
3	200	220	240	0,30	0,30	0,30	200,0 / 240,0	200,0 / 240,0	195,4 / 215,3	220,4 / 242,5
4	200	250	300	0,30	0,30	0,30	200,0 / 300,0	200,0 / 300,0	193,7 / 293,4	216,9 / 324,8
5	200	200	200	0,30	0,33	0,36	197,4 / 201,3	198,3 / 206,7	197,6 / 204,7	217,8 / 233,5
6	200	200	200	0,30	0,36	0,42	196,6 / 203,2	196,3 / 219,0	201,9 / 219,0	215,9 / 258,0
7	200	200	200	0,30	0,27	0,24	199,1 / 203,9	196,5 / 201,5	190,1 / 194,7	211,0 / 221,7
8	200	200	200	0,30	0,24	0,21	198,5 / 205,6	195,7 / 202,8	190,8 / 199,2	208,3 / 223,6
9	200	200	200	0,21	0,24	0,30	194,7 / 201,5	199,1 / 208,3	188,8 / 194,6	208,3 / 223,3

Таблица 2 — Результаты расчета для случая обработанного слоя на части длины и толщине промежуточного слоя 0,2 мм
Table 2 — Calculation results for the case of the treated layer on the part of the length and thickness of the intermediate layer of 0.2 mm

№	Модуль упругости E , ГПа			Коэффициент Пуассона μ			Интенсивность напряжений σ_i $\sigma_i^{\min} / \sigma_i^{\max}$	Продольные напряжения σ_z $\sigma_z^{\min} / \sigma_z^{\max}$	Интенсивность напряжений σ_i $\sigma_i^{\min} / \sigma_i^{\max}$	Продольные напряжения σ_z $\sigma_z^{\min} / \sigma_z^{\max}$
	E_{bas}	E_{int}	E_{pr}	μ_{bas}	μ_{int}	μ_{pr}				
1	200	200	200	0,30	0,30	0,30	177,7 / 220,4	167,3 / 232,2	172,6 / 217,0	184,1 / 259,3
2	200	210	220	0,30	0,30	0,30	184,4 / 228,7	172,9 / 239,8	179,0 / 225,7	189,8 / 261,6
3	200	220	240	0,30	0,30	0,30	191,2 / 237,7	178,5 / 248,7	185,5 / 234,5	195,4 / 270,8
4	200	250	300	0,30	0,30	0,30	188,7 / 287,3	181,5 / 289,0	181,8 / 281,3	200,4 / 312,5
5	200	200	200	0,30	0,33	0,36	177,1 / 219,0	167,2 / 234,8	173,8 / 214,9	185,9 / 259,1
6	200	200	200	0,30	0,36	0,42	177,1 / 217,5	165,7 / 239,7	173,6 / 214,8	184,5 / 266,3
7	200	200	200	0,30	0,27	0,24	178,8 / 223,6	167,7 / 232,4	172,2 / 219,3	182,9 / 259,3
8	200	200	200	0,30	0,24	0,21	180,8 / 227,5	168,6 / 232,4	173,6 / 223,9	182,5 / 259,2
9	200	200	200	0,21	0,24	0,30	174,8 / 223,0	170,9 / 231,3	166,9 / 213,2	180,0 / 242,7

Таблица 3 — Результаты расчета для случая обработанного слоя на части длины и толщине промежуточного слоя 0,1 мм
Table 3 — Calculation results for the case of the treated layer on the part of the length and thickness of the intermediate layer of 0.1 mm

№	Модуль упругости E , ГПа			Коэффициент Пуассона μ			Интенсивность напряжений σ_i $\sigma_i^{\min} / \sigma_i^{\max}$	Продольные напряжения σ_z $\sigma_z^{\min} / \sigma_z^{\max}$	Интенсивность напряжений σ_i $\sigma_i^{\min} / \sigma_i^{\max}$	Продольные напряжения σ_z $\sigma_z^{\min} / \sigma_z^{\max}$
	E_{bas}	E_{int}	E_{pr}	μ_{bas}	μ_{int}	μ_{pr}				
1	200	200	200	0,30	0,30	0,30	177,7 / 200,2	167,3 / 222,6	172,6 / 216,7	184,1 / 245,6
2	200	210	220	0,30	0,30	0,30	177,3 / 228,0	166,7 / 231,2	170,3 / 237,9	183,2 / 260,9
3	200	220	240	0,30	0,30	0,30	176,9 / 237,2	166,2 / 240,0	168,4 / 249,7	182,4 / 276,9
4	200	250	300	0,30	0,30	0,30	176,8 / 289,5	164,9 / 290,9	169,3 / 283,6	183,0 / 314,4
5	200	200	200	0,30	0,33	0,36	179,7 / 219,7	167,7 / 226,6	178,1 / 218,5	183,9 / 251,4
6	200	200	200	0,30	0,36	0,42	181,5 / 219,6	164,9 / 232,3	179,3 / 221,7	179,9 / 260,6
7	200	200	200	0,30	0,27	0,24	176,3 / 221,7	166,9 / 223,1	168,2 / 217,7	183,7 / 247,3
8	200	200	200	0,30	0,24	0,21	175,7 / 225,3	166,9 / 224,1	165,6 / 221,6	183,8 / 249,2
9	200	200	200	0,21	0,24	0,30	177,8 / 223,1	171,1 / 223,1	171,0 / 216,9	178,9 / 234,9

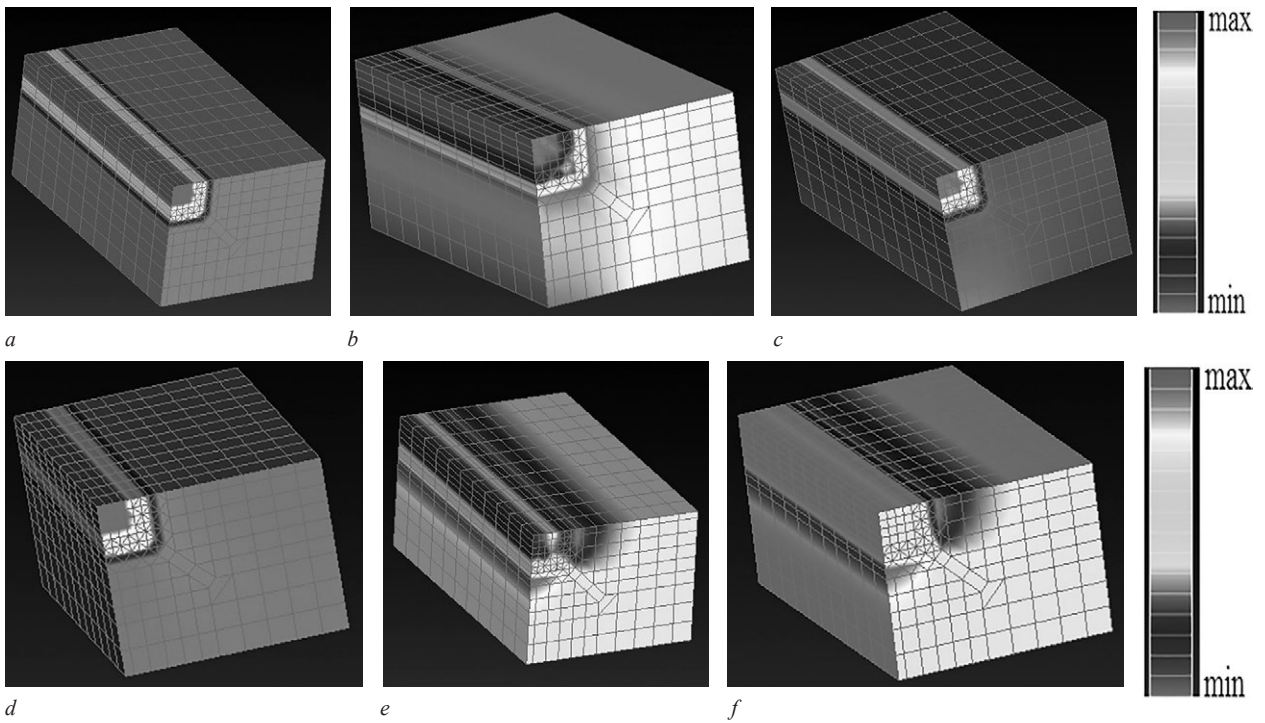


Рисунок 3 — Распределение эквивалентных напряжений по критерию Мизеса σ_i при термообработке по всей длине, свободной (a–c) и закрепленной (d–f) правой грани, толщина промежуточного слоя 0,2 мм: a, d — $E_{bas} = 200$ ГПа, $E_{int} = 250$ ГПа, $E_{pr} = 300$ ГПа, $\mu_{bas} = 0,3$, $\mu_{int} = 0,3$, $\mu_{pr} = 0,3$; b, e — $E_{bas} = 200$ ГПа, $E_{int} = 200$ ГПа, $E_{pr} = 200$ ГПа, $\mu_{bas} = 0,3$, $\mu_{int} = 0,36$, $\mu_{pr} = 0,42$; c, f — $E_{bas} = 200$ ГПа, $E_{int} = 200$ ГПа, $E_{pr} = 200$ ГПа, $\mu_{bas} = 0,3$, $\mu_{int} = 0,24$, $\mu_{pr} = 0,21$

Figure 3 — Distribution of equivalent stresses according to the Mises criterion σ_i during heat treatment along the entire length, free (a–c) and fixed (d–f) right side, the thickness of the intermediate layer is 0.2 mm: a, d — $E_{bas} = 200$ GPa, $E_{int} = 250$ GPa, $E_{pr} = 300$ GPa, $\mu_{bas} = 0,3$, $\mu_{int} = 0,3$, $\mu_{pr} = 0,3$; b, e — $E_{bas} = 200$ GPa, $E_{int} = 200$ GPa, $E_{pr} = 200$ GPa, $\mu_{bas} = 0,3$, $\mu_{int} = 0,36$, $\mu_{pr} = 0,42$; c, f — $E_{bas} = 200$ GPa, $E_{int} = 200$ GPa, $E_{pr} = 200$ GPa, $\mu_{bas} = 0,3$, $\mu_{int} = 0,24$, $\mu_{pr} = 0,21$

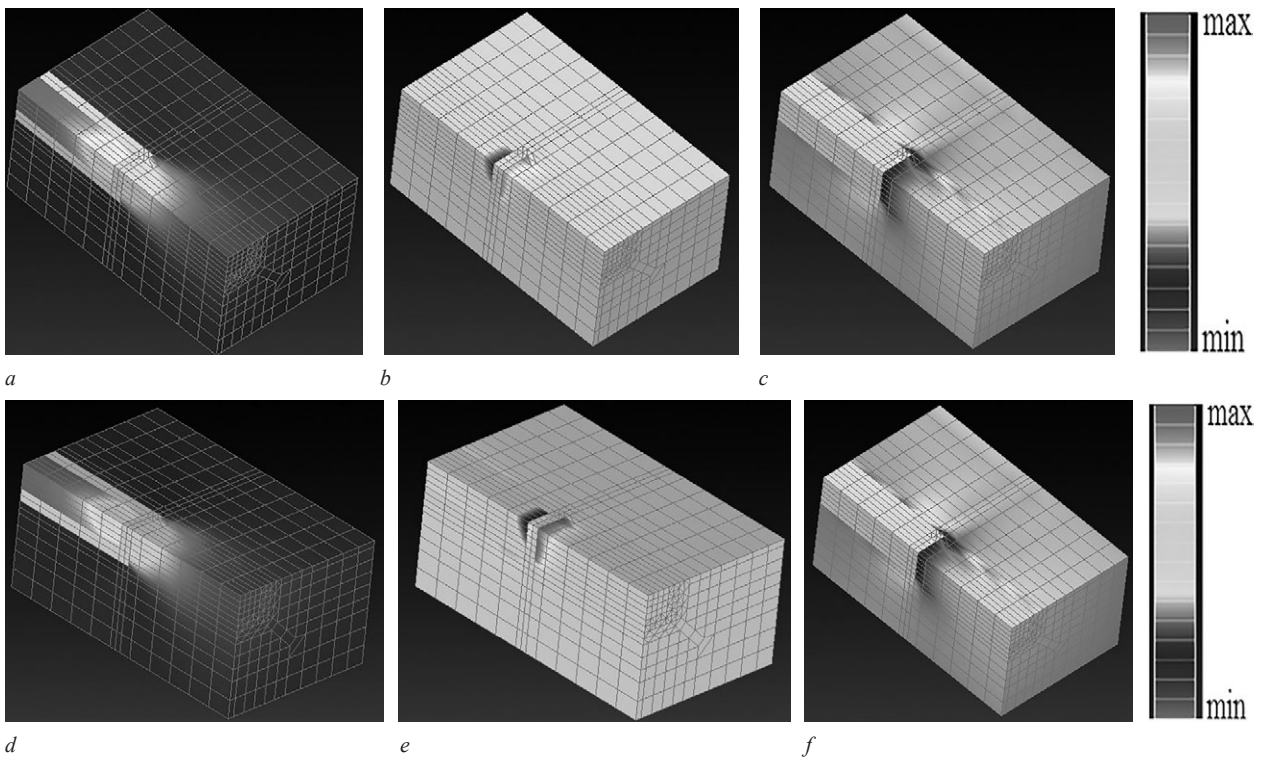


Рисунок 4 — Распределение эквивалентных напряжений по критерию Мизеса σ_i при термообработке части длины, свободной (a–c) и закрепленной (d–f) правой грани, толщина промежуточного слоя 0,2 мм: a, d — $E_{bas} = 200$ ГПа, $E_{int} = 250$ ГПа, $E_{pr} = 300$ ГПа, $\mu_{bas} = 0,3$, $\mu_{int} = 0,3$, $\mu_{pr} = 0,3$; b, e — $E_{bas} = 200$ ГПа, $E_{int} = 200$ ГПа, $E_{pr} = 200$ ГПа, $\mu_{bas} = 0,3$, $\mu_{int} = 0,36$, $\mu_{pr} = 0,42$; c, f — $E_{bas} = 200$ ГПа, $E_{int} = 200$ ГПа, $E_{pr} = 200$ ГПа, $\mu_{bas} = 0,3$, $\mu_{int} = 0,24$, $\mu_{pr} = 0,21$

Figure 4 — Distribution of equivalent stresses according to the Mises criterion σ_i during heat treatment of the part of the length, free (a–c) and fixed (d–f) right side, the thickness of the intermediate layer is 0.2 mm: a, d — $E_{bas} = 200$ GPa, $E_{int} = 250$ GPa, $E_{pr} = 300$ GPa, $\mu_{bas} = 0,3$, $\mu_{int} = 0,3$, $\mu_{pr} = 0,3$; b, e — $E_{bas} = 200$ GPa, $E_{int} = 200$ GPa, $E_{pr} = 200$ GPa, $\mu_{bas} = 0,3$, $\mu_{int} = 0,36$, $\mu_{pr} = 0,42$; c, f — $E_{bas} = 200$ GPa, $E_{int} = 200$ GPa, $E_{pr} = 200$ GPa, $\mu_{bas} = 0,3$, $\mu_{int} = 0,24$, $\mu_{pr} = 0,21$

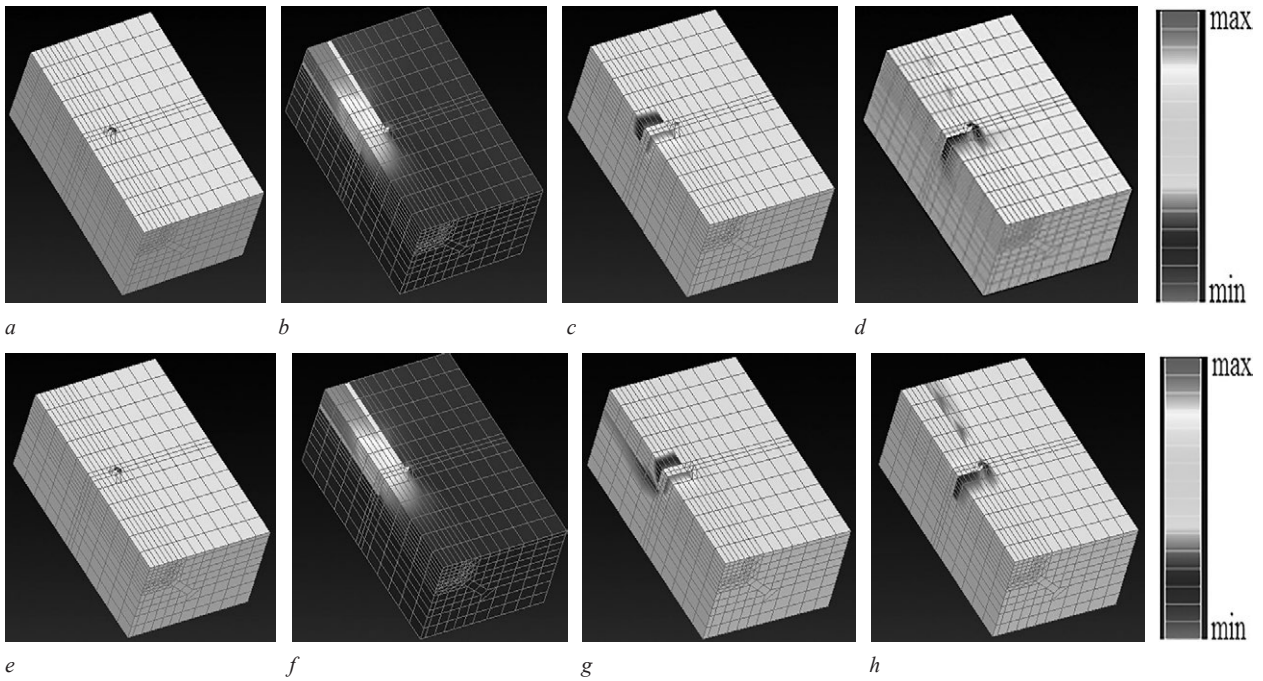


Рисунок 5 — Распределение эквивалентных напряжений по критерию Мизеса σ_i при термообработке части длины, свободной (a–d) и закрепленной (e–h) правой грани, толщина промежуточного слоя 0,1 мм: a, e — $E_{bas} = 200$ ГПа, $E_{int} = 200$ ГПа, $E_{pr} = 200$ ГПа, $\mu_{bas} = 0,3$, $\mu_{int} = 0,3$, $\mu_{pr} = 0,3$; b, f — $E_{bas} = 200$ ГПа, $E_{int} = 250$ ГПа, $E_{pr} = 300$ ГПа, $\mu_{bas} = 0,3$, $\mu_{int} = 0,3$, $\mu_{pr} = 0,3$; c, d — $E_{bas} = 200$ ГПа, $E_{int} = 200$ ГПа, $E_{pr} = 200$ ГПа, $\mu_{bas} = 0,3$, $\mu_{int} = 0,36$, $\mu_{pr} = 0,42$; d, h — $E_{bas} = 200$ ГПа, $E_{int} = 200$ ГПа, $E_{pr} = 200$ ГПа, $\mu_{bas} = 0,3$, $\mu_{int} = 0,24$, $\mu_{pr} = 0,21$
Figure 5 — Distribution of equivalent stresses according to the Mises criterion σ_i during heat treatment of the part of the length, free (a–d) and fixed (e–h) right side, the thickness of the intermediate layer is 0.1 mm: a, e — $E_{bas} = 200$ GPa, $E_{int} = 200$ GPa, $E_{pr} = 200$ GPa, $\mu_{bas} = 0,3$, $\mu_{int} = 0,3$, $\mu_{pr} = 0,3$; b, f — $E_{bas} = 200$ GPa, $E_{int} = 250$ GPa, $E_{pr} = 300$ GPa, $\mu_{bas} = 0,3$, $\mu_{int} = 0,3$, $\mu_{pr} = 0,3$; c, d — $E_{bas} = 200$ GPa, $E_{int} = 200$ GPa, $E_{pr} = 200$ GPa, $\mu_{bas} = 0,3$, $\mu_{int} = 0,36$, $\mu_{pr} = 0,42$; d, h — $E_{bas} = 200$ GPa, $E_{int} = 200$ GPa, $E_{pr} = 200$ GPa, $\mu_{bas} = 0,3$, $\mu_{int} = 0,24$, $\mu_{pr} = 0,21$

и максимальные значения интенсивности напряжений (эквивалентные напряжения по критерию Мизеса) σ_i и напряжений σ_z могут относиться к разным слоям и элементам. При стесненной деформации поперечные напряжения σ_x могут достигать 30–45 % от продольных.

На рисунках 3–5 приведены распределения эквивалентных напряжений σ_i по объему материала для соответствующих между собой характеристик материала и разных геометрических условий, касающихся геометрии обработки. Сравнивая их, можно определить направление

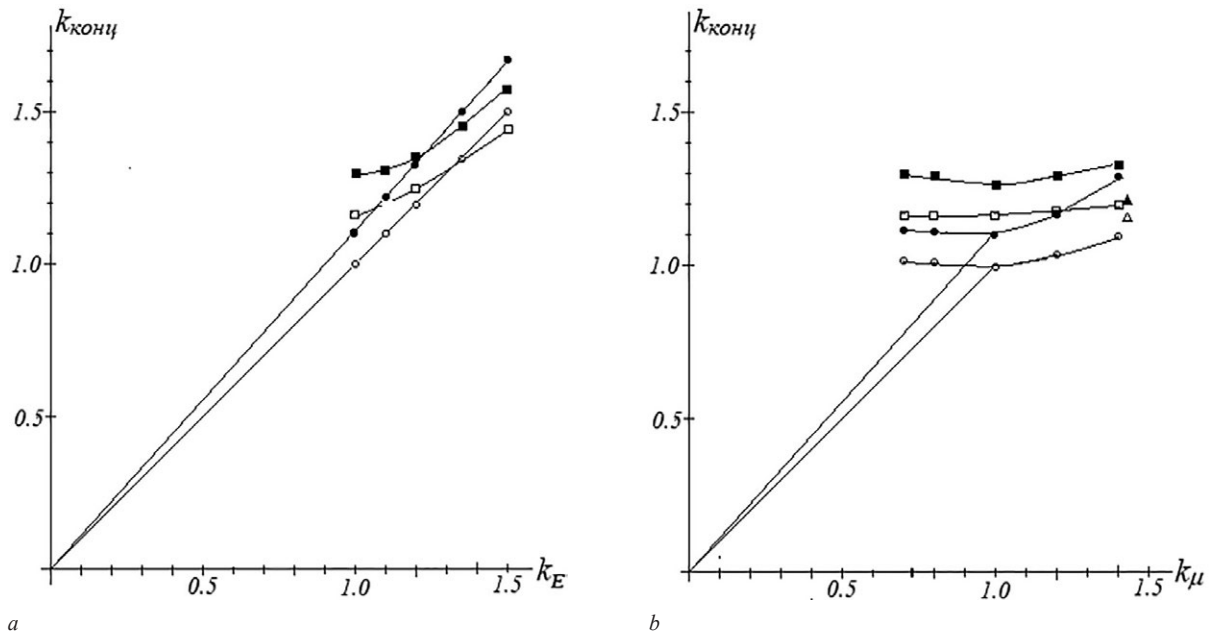


Рисунок 6 — Влияние модуля упругости (a) и коэффициента Пуассона (b) на продольные напряжения, промежуточный слой 0,2 мм: \circ — длинная дорожка; \square — укороченная дорожка
Figure 6 — Effect of the elastic modulus (a) and Poisson's ratio (b) on longitudinal stresses, intermediate layer is 0.2 mm: \circ — long track; \square — shortened track

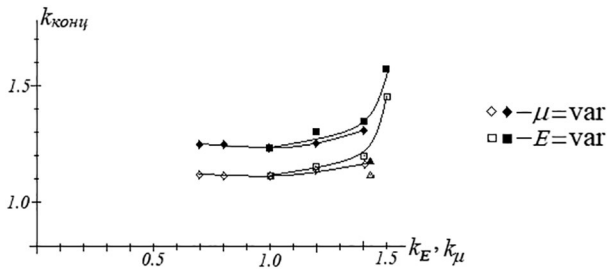


Рисунок 7 — Влияние модуля упругости и коэффициента Пуассона на продольные напряжения при укороченной дорожке с промежуточным слоем толщиной 0,1 мм
 Figure 7 — Effect of the elastic modulus and Poisson's ratio on longitudinal stresses with shortened track with intermediate layer of 0.1 mm

изменения НДС материала в зависимости от этих параметров.

Результаты показывают, что любое отклонение от исходных параметров ведет к изменению распределения напряжений по объему детали. Их максимум может реализоваться как в обработанном слое, так и в основном материале, промежуточном слое или на границах слоев. При возрастании модуля упругости обработанного слоя над модулем исходного материала всегда имеет место и возрастание максимальных напряжений σ_i и σ_z , в то время как возникающие на границе переходной зоны и основного материала минимальные σ_i и σ_z этой закономерности не подчиняются. Возможно, здесь играет роль и геометрия конечно-элементного разбиения, поскольку известно, например, что тетрагональные элементы имеют повышенную жесткость сравнительно с прямоугольными.

Отклонение коэффициента Пуассона обработанной зоны от коэффициента для исходного (основного) материала в любую сторону ведет к возрастанию максимальных напряжений, но по-разному может сказаться на уровне минимальных. Результаты исследований представлены графиками на рисунках 6, 7. При изменении коэффициента Пуассона исходного материала построения на этих рисунках также определенным образом изменятся, что для частного случая (по данным строки 9 таблиц) отражено на них треугольными значками. Указанные замечания относительно влияния коэффициентов Пуассона соответствуют [1].

На рисунках 6, 7 приведены значения отношений σ_z^{\max} к опорному значению $\sigma_z = 200$ МПа в зависимости от отношений $k_E = E_{pr} / E_{bas}$ или $k_\mu = \mu_{pr} / \mu_{bas}$, которые можно рассматривать как коэффициенты концентрации напряжений для данной задачи $k_{конц} = \sigma_z^{\max} / \sigma_{ном}$.

На рисунке 6 на прямых лучах, исходящих из начала координат, отложены $k_{конц}$, относящиеся к варьированию отношениями E_{pr} / E_{bas} , а отдельными значками показаны $k_{конц}$, относящиеся к варьированию отношениями μ_{pr} / μ_{bas} . Светлые значки относятся к случаю свободной правой грани $U_x \neq 0$ (случай стержня), а темные — к случаю закрепленной грани $U_x = 0$ (стесненное деформирование).

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

Установлено, что для схемы с укороченной дорожкой при обнулении толщины t промежуточного

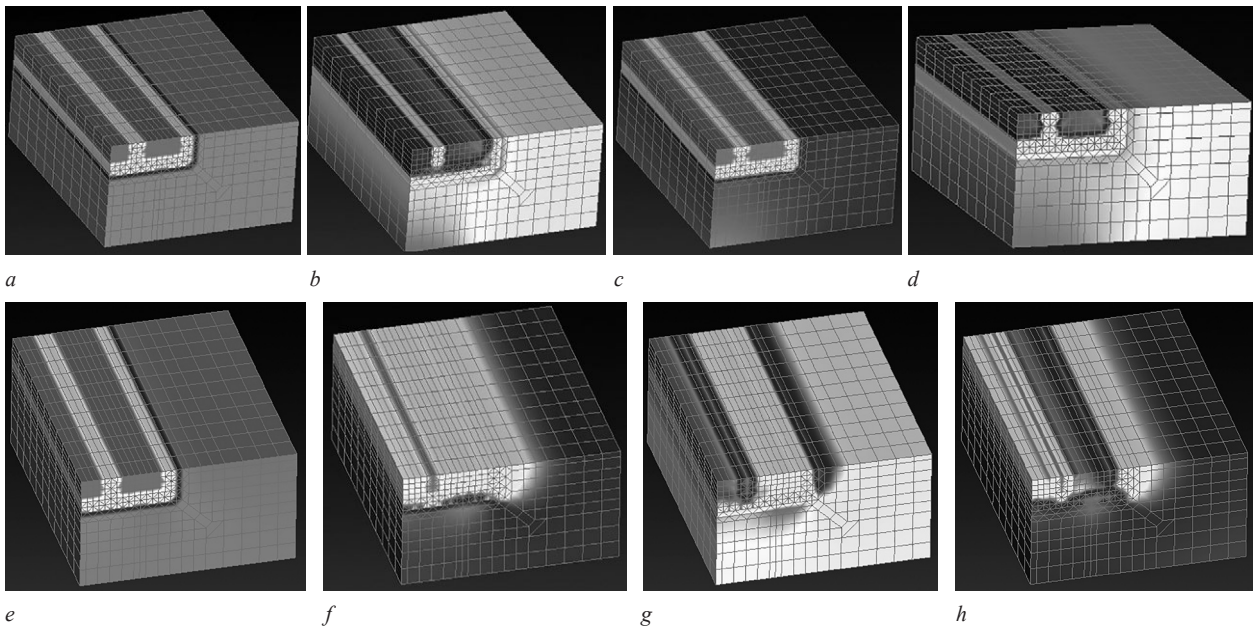


Рисунок 8 — Распределение эквивалентных напряжений по критерию Мизеса σ , при свободной (a-d) и закрепленной (e-h) правой грани: a, e — $E_{bas} = 200$ ГПа, $E_{int} = 250$ ГПа, $E_{pr} = 300$ ГПа, $\mu_{bas} = 0,3$, $\mu_{int} = 0,3$, $\mu_{pr} = 0,3$; b, f — $E_{bas} = 200$ ГПа, $E_{int} = 200$ ГПа, $E_{pr} = 200$ ГПа, $\mu_{bas} = 0,3$, $\mu_{int} = 0,36$, $\mu_{pr} = 0,42$; c, g — $E_{bas} = 200$ ГПа, $E_{int} = 200$ ГПа, $E_{pr} = 200$ ГПа, $\mu_{bas} = 0,3$, $\mu_{int} = 0,24$, $\mu_{pr} = 0,21$; d, h — $E_{bas} = 200$ ГПа, $E_{int} = 200$ ГПа, $E_{pr} = 200$ ГПа, $\mu_{bas} = 0,21$, $\mu_{int} = 0,24$, $\mu_{pr} = 0,3$

Figure 8 — Distribution of equivalent stresses according to the Mises criterion σ , with free (a-d) and fixed (e-h) right side:

a, e — $E_{bas} = 200$ GPa, $E_{int} = 250$ GPa, $E_{pr} = 300$ GPa, $\mu_{bas} = 0,3$, $\mu_{int} = 0,3$, $\mu_{pr} = 0,3$; b, f — $E_{bas} = 200$ GPa, $E_{int} = 200$ GPa, $E_{pr} = 200$ GPa, $\mu_{bas} = 0,3$, $\mu_{int} = 0,36$, $\mu_{pr} = 0,42$; c, g — $E_{bas} = 200$ GPa, $E_{int} = 200$ GPa, $E_{pr} = 200$ GPa, $\mu_{bas} = 0,3$, $\mu_{int} = 0,24$, $\mu_{pr} = 0,21$; d, h — $E_{bas} = 200$ GPa, $E_{int} = 200$ GPa, $E_{pr} = 200$ GPa, $\mu_{bas} = 0,21$, $\mu_{int} = 0,24$, $\mu_{pr} = 0,3$

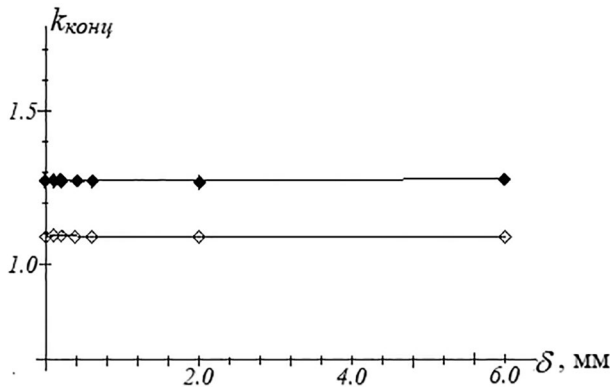


Рисунок 9 — Зависимость коэффициента концентрации продольных напряжений $k_{\text{конц}}$ от расстояния δ между дорожками

Figure 9 — Dependence of the coefficient of concentration of longitudinal stresses $k_{\text{конц}}$ on the distance δ between tracks

слоя изменение коэффициента Пуассона относительно значения для исходного материала приводит к незначительному снижению концентрации напряжений, а для $\mu_{\text{пр}} \leq 0,3$ коэффициент $k_{\text{конц}}$ приближается снизу к значениям для $t = 0,2$ мм, что позволяет предположить существование толщины $t_{\text{пром}}$, которой соответствует минимальный уровень концентрации напряжений возле обработанной дорожки.

Рассмотрен также случай наличия по всей длине образца трех параллельных дорожек, расположенных симметрично на расстояниях $\delta = 0,0-6,0$ мм друг от друга. В качестве примера на рисунке 8 показано распределение интенсивности напряжений σ_i для случая, когда расстояние между дорожками составляет $\delta = 0,2$ мм.

Результаты расчетов указывают на незначительное влияние расстояния δ на напряженное состояние материала, что иллюстрируется рисунком 9, где показаны значения коэффициента концентрации продольных напряжений $k_{\text{конц}}$, который практически не отличается от его значений для одиночной дорожки. Объяснением этому факту служит то обстоятельство, что в данном случае максимум продольных напряжений σ_z и близких им главных напряжений σ_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.

Заключение. В статье проведены исследования влияния различных механических характеристик (модуля упругости и коэффициента Пуассона) материала стержня, которые могут возникнуть при лазерной, плазменной и других высокоэнергетических методах сосредоточенного воздействия, и заключаются в появлении двух зон с характеристиками, отличными от основного материала. По результатам конечно-элементного

моделирования задачи о растяжении стержня с зонами измененной структуры исходного материала исследовано НДС стержня с дорожками по всей его длине и на части длины для различных граничных условий и толщины промежуточного слоя. Получены зависимости коэффициента концентрации напряжений от отношений модуля упругости и коэффициента Пуассона обработанного материала к основному. Исследовано влияние наличия нескольких дорожек на напряженное состояние.

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 дорожки и исходной детали, толщин промежуточного слоя, соотношений модулей и коэффициентов Пуассона материалов слоев). Это обстоятельство показывает как решающую важность знания точных механических характеристик материала в зоне локального воздействия, так и необходимость проведения расчетов на прочность заданной детали с учетом наличия этого воздействия, без чего невозможен выбор оптимального режима обработки для обеспечения требуемых эксплуатационных свойств упрочняемых деталей.

Список литературы:

1. Мусхелишвили, Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н.И. Мусхелишвили. — М.: Наука, Главн. ред. физ.-мат. лит., 1966. — 708 с.
2. Нейбер, Г. Концентрация напряжений / Г. Нейбер; пер. с нем. Н.Н. Лебедева; под ред. А.И. Лурье. — М.—Л.: Гостехиздат, 1947. — 204 с.
3. Савин, Г.Н. Концентрация напряжений около отверстий / Г.Н. Савин. — М.—Л.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1951. — 496 с.
4. Прочность, устойчивость, колебания: справ.: в 3 т. / под ред. И.А. Биргера, Я.Г. Пановко. — М.: Машиностроение, 1968. — Т. 2. — 463 с.
5. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: в 2 т. / под ред. Ю. Мураками; пер. В.И. Даниленко. — М.: Мир, 1990. — Т. 1. — 447 с. — Т. 2. — 453 с.
6. Черепанов, Г.П. Механика хрупкого разрушения / Г.П. Черепанов. — М.: Наука, 1974. — 640 с.
7. 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.
8. Петерсон, Р. Коэффициенты концентрации напряжений. Графики и формулы для расчета конструктивных элементов на прочность / Р. Петерсон; пер. с англ. И.А. Нечай, И.П. Сухарев, Б.Н. Ушаков. — М.: Мир, 1977. — 302 с.
9. Белый, А.В. Поверхностная упрочняющая обработка с применением концентрированных потоков энергии / А.В. Белый, Е.М. Макушок, И.Л. Поболь; под ред. В.И. Беляева. — Минск: Навука і тэхніка, 1990. — 78 с.
10. 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.
11. 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.
12. Гулаков, С.В. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния элементов составных кон-

- струкций при воздействии локального источника нагрева / С.В. Гулаков, С.В. Щербаков, Н.Г. Заварика // Вісн. Приазов. держ. техн. ун-ту. — 2004. — Вип. 14. — С. 223–226.
13. 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, iss. 12. — P. 1669. — DOI: <https://doi.org/10.3390/met10121669>.
14. Гуляев, А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. — М.: Книга по требованию, 2020. — 542 с.
15. Dinesh Babu, P. Laser surface hardening / P. Dinesh Babu, K.R. Balasubramanian, G.H. Buvanashakaran // A review. Int. J. Surface Science and Engineering. — 2011. — Vol. 5, nos. 2/3. — Pp. 131–151.

VERAMEICHYK Andrei I., Ph. D. in Phys. and Math., Assoc. Prof.

Senior Researcher of the Test Center¹

E-mail: vai_mrtm@bstu.by

NERODA Mikhail V., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

First Vice-Rector¹

E-mail: nerodamv@mail.ru

KHOLODAR Boris G., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Senior Researcher of the Research Department¹

E-mail: hbg@list.ru

¹Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus

Received 19 April 2022.

FINITE ELEMENT MODELING OF THE PROBLEM OF STRETCHING A MATERIAL WITH ZONES OF ALTERED STRUCTURE

The article considers computer simulation of tensile tests of a rectangular cross-section rod with zones formed during heat treatment by a moving highly concentrated heat source, the characteristics of which differ from the properties of the base material. Based on the results of finite element modeling, the stress-strain state of a rod with one or more zones of altered structure along its entire length and on part of the length is investigated. The stress concentration coefficients in the vicinity of the treatment zones are determined.

Keywords: mechanical characteristics of the material, stress concentration coefficient, finite element method, local impact, material structure, stress intensity

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-3-60-77-84>

References

- Muskhelishvili N.I. *Nekotorye osnovnye zadachi matematicheskoy teorii uprugosti* [Some basic problems of the mathematical theory of elasticity]. Moscow, Nauka Publ., Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury Publ., 1966. 708 p. (in Russ.).
- Neuber H. *Kerbspannungslehre: Grundlagen für genaue Spannungsrechnung*. Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1937.
- Savin G.N. *Kontsentratsiya napryazheniy okolo otverstiy* [Stress concentration near holes]. Moscow, Leningrad, Gosudarstvennoe izdatelstvo tekhniko-teoreticheskoy literatury Publ., 1951. 496 p. (in Russ.).
- Aleksandrov A.Ya., et al. *Prochnost, ustoychivost, kolebaniya. Tom 2* [Strength, stability, fluctuations. Volume 2]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 463 p. (in Russ.).
- Spravochnik po koeffitsientam intensivnosti napryazheniy* [Handbook of stress intensity coefficients]. Moscow, Mir Publ., 1990. Vol. 1, 447 p., vol. 2, 453 p. (in Russ.).
- Cherepanov G. P. *Mekhanika khrupkogo razrusheniya* [Mechanics of brittle fracture]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 640 p. (in Russ.).
- Berezhnitskiy L.T., Delyavskiy M.V., Panasyuk V.V. *Izhib tonkikh plastin s defektami tipa treshchin* [Bending of thin plates with defects such as cracks]. Kiev, Nauchnaya mysl Publ., 1979. 400 p. (in Russ.).
- Peterson R.E. *Stress concentration factors*. New York, London, Sydney, Toronto, John Wiley and Sons, 1974.
- Bely A.V., Makushok E.M., Pobol I.L. *Poverkhnostnaya uprochnyayushchaya obrabotka s primeneniem kontsentririrovannykh potokov energii* [Surface hardening treatment with the use of concentrated energy flows]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1990. 78 p. (in Russ.).
- Ivantsievskiy V.V. *Upravlenie strukturnym i napryazhennym sostoyaniem poverkhnostnykh sloev detaley mashin pri ikh uprochnenii s ispolzovaniem kontsentririrovannykh istochnikov nagreva i finishnogo shlifovaniya*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Control of the structural and stress state of the surface layers of machine parts during their hardening using concentrated sources of heating and finishing grinding. D. Sc. Thesis]. Novosibirsk, 2012. 425 p. (in Russ.).
- Sharapova D.M. *Evolutsiya struktury i svoystv konstruktsionnykh nizkolegirovannykh staley pri kratkovremennykh lokalnykh termicheskikh vozdeystviyakh kontsentririrovannymi istochnikami tepla*. Diss. kand. tekhn. nauk [Evolution of structure and properties of structural low-alloy steels under short-term local thermal effects by concentrated heat sources. Ph. D. Thesis]. Saint Petersburg, 2018. 140 p. (in Russ.).
- Gulakov S.V., Shcherbakov S.V., Zavarika N.G. *Kompyuternoe modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya elementov sostavnykh konstruksiy pri vozdeystvii lokalnogo istochnika nagreva* [Computer simulation of the stress-strain state of elements of composite structures under the influence of a local heating source]. *Reporter of the Priazovskiy State Technical University*, 2004, iss. 14, pp. 223–226 (in Russ.).
- Grigoriev S.N., Ivannikov A. Yu., Prozhega M.V., Zakharov I.N., Kuznetsova O.G., Levin A.M. The influence of the highly concentrated energy treatments on the structure and properties of medium carbon steel. *Metals*, 2020, vol. 10, iss. 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/met10121669>.
- Gulyaev A.P. *Metallovedenie* [Metallurgical science]. Moscow, Kniga po trebovaniyu Publ., 2020. 542 p. (in Russ.).
- Dinesh Babu P., Balasubramanian K.R., Buvanashakaran G. Laser surface hardening: a review. *International journal of surface science and engineering*, 2011, vol. 5, nos. 2–3, pp. 131–151.