

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования

«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ПРИКЛАДНАЯ МЕХАНИКА

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

ростись *инициалы, фамилия*

«__» _____ 20__ г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

15.03.03 «Прикладная механика»

**Исследование структурной неоднородности характеристик
механических свойств**

Руководитель _____ доцент, к.т.н. Е.В. Анискович

Выпускник _____ А.А. Амирханов

Красноярск 2019

Содержание

	Введение.....	3
	1 Описание исследований структурной неоднородности характеристик механических свойств.....	5
	1.1 Материал и методика исследования.....	5
	1.2 Результаты и их обсуждение.....	7
	1.3 Зона термического влияния, граничащая с линией сплавления. Структурная неоднородность в зоне термического влияния.....	10
	1.4 Механизм образования горячих трещин.....	12
	1.5 Связь между механическими характеристиками, определяемыми из опытов на растяжение, и пределом выносливости.....	17
	2 Обзор по конструкциям и материалам.....	22
	2.1 Обзор по конструкциям и материалам.....	22
	2.2 Классификация КМ по геометрии компонентов.....	26
	2.3 Классификация КМ по расположению компонентов.....	28
	2.4 Классификация КМ по природе компонентов.....	30
	2.5 Классификация КМ по материалу матрицы (материаловедческий принцип).....	31
	2.6 Методы определения механических свойств композиционных материалов.....	32
	2.7 Механика усталостного разрушения трещин.....	35
	3 Расчет напряжений методом конечных элементов в программном комплексе Solidworks.....	37
	3.1 Основы метода конечных элементов.....	37
	3.2 Расчет пластины МКЭ в Solidworks.....	37
	3.3 Генерация конечно-элементной сетки.....	39
	3.4 Нагрузки и граничные условия.....	40
	3.5 Граничные условия для пластины с трещиной.....	41
	3.6 Задание нагрузок.....	42
	3.7 Создание неоднородных механических свойств.....	42
	3.8 Определение напряжений.....	42
	3.9 Определение перемещений.....	44
	Заключение.....	47
	Список используемых источников.....	48

Перв. примен.

Справ. №

Подпись и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	

БР – 15.03.03 ПЗ

Лист

2

ВВЕДЕНИЕ

В разработке методов расчета элементов конструкций большое значения имеет учет реальных свойств конструкционных материалов. Классические представления о сплошном, однородном, изотропном, линейно-упругом теле в большинстве случаев не удовлетворяют практику, так как почти все материалы, применяемые в технике (металлы и сплавы с неоднородной поликристаллической структурой, бетон, кирпич, дерево, различного рода армированные пластики и т.п.) являются композиционными материалами, обладающими неоднородностью строения и анизотропией свойств. Широкое распространение в технике структурно-неоднородных материалов требует разработки и создания механики их деформирования и разрушения, а также расчетных моделей структурно-неоднородных тел.

Разработаны методы исследования анизотропии физико-механических свойств, включающими следующие вопросы: вопросы построения векториальных моделей упругих свойств кубических, гексагональных и тригональных кристаллов и на их основе определение характеристик анизотропии различными методами, включающими статические методы; вопросы пластической анизотропии на основе исследования микронеоднородности деформаций на различных базах измерения и ее оценки с помощью коэффициента вариации; вопросы прочностной анизотропии на основе исследования микротвердости большого числа зерен при малой нагрузке на индентор.

Вопросы учета реальных свойств материалов имеют большое значение в развитии механики твердого деформируемого тела. Широкое распространение в технике структурно-неоднородных материалов требует разработки и создания механики их деформирования и разрушения, т.е. механики структурно-неоднородных тел. Необходимость разработки такой теории дополнительно усиливается тем, что свойства самого материала могут в известной степени назначаться в процессе проектирования.

В ряде работ на основе расчета статистических моделей структурно-неоднородных материалов, разработанных с использованием приема рассмотрения на различных уровнях, исследуются напряженно-деформированные состояния в микрообъемах при различных видах напряженного состояния и рассматриваются микроструктурные факторы концентрации напряжений и деформаций. В связи с широким распространением в строительстве различных бетонов, обладающих неоднородностью и анизотропией свойств, большое значение приобретает вопрос о влиянии анизотропии структурных составляющих на концентрацию напряжений и деформаций.

Исследованию этого вопроса посвящен ряд работ, что связано с актуальностью проблемы и ее сложностью. Тем не менее, в настоящее время еще недостаточно исследованы неоднородность напряженно-деформированных

Перв. примен.

Справ. №

Подпись и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

Лист

БР – 15.03.03 ПЗ

3

Изм. Лист № докум. Подпись Дата

Перв. примен.

состояний, и, как следствие, концентрация напряжений в бетоне с учетом анизотропии упругих свойств заполнителя и различных факторов, что обусловлено, в частности, сложностью пространственной модели материала, контура зерна заполнителя в зоне концентрации, наличием в теле изотропной матрицы трещин и пор, т.е. сложностью геометрической модели.

Недостаточно полно исследованы процессы взаимодействия между изотропной матрицей и зернами анизотропного заполнителя, приводящие к неоднородности напряженно-деформированного состояния, что необходимо учитывать при расчетах элементов конструкций, изготовленных из бетона, и оценивать прочностные свойства в целом с учетом свойств матрицы и заполнителя

Изучение напряженно-деформированных состояний играет большую роль в оценке прочности элементов конструкций, имеющих различные факторы концентрации напряжений. Детальное изучение напряженно-деформированного состояния в местах концентрации является обязательной частью общего прочностного расчета соответствующих конструкций и важнейшей предпосылкой для создания оптимальных и надежных конструкций.

Справ. №

Подпись и дата

Име. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Име. № подл.

Лист

БР – 15.03.03 ПЗ

4

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

1 Описание исследований структурной неоднородности характеристик механических свойств.

1.1 Материал и методика исследования.

В качестве объектов исследования были использованы листовые заготовки толщиной 1,5 мм из сплава 01420Т в состаренном состоянии, т.е. после полной термообработки. Сварка осуществлялась на газовом CO₂-лазере ИТПМ СО РАН. Мощность излучения составила 3,5 кВт, скорость перемещения детали относительно луча 1.5 м/мин, длина волны излучения $\lambda = 10,6$ мкм. В качестве защитного газа был использован гелий, обдувку сварного соединения производили сверху. Сплав имел следующий химический состав(масс. %): 5.6 Mg, 0.2-0.4 Mn, 1.9-2.3 Li, 0.005 Cu, 0.007 Si, 0.09-0.15 Zr, 0.3 Fe, 0.1 Ti, 0.005 Na, Al- остальное.

Поверхность шлифов, изготовленных по поперечному резу шва, исследовали методами оптической металлографии на микроскопе Neophot 21, микрорентгеноспектрального анализа на приборах Camebax и Tescan vega 2 хму с приставкой Oxford.

Для исследования характера распределения модуля нормальной упругости в зоне сварного соединения проводили испытания, заключающиеся во внедрении алмазного индентора Виккерса. Испытания проводили вдоль линий сканирования поперек шлифа через все зоны сварного соединения и по толщине с шагом 15–20 мкм. Построена серия кривых «усилие – глубина внедрения индентора», типичный вид диаграмм приведен на рисунке 1.



Рисунок 1- Диаграмма внедрения индентора: 1 — стадия нагрузки; 2 — стадия разгрузки

Модуль упругости определяли с помощью методики Оливера–Фарра по начальному наклону кривой «усилие – глубина» на стадии разгрузки в соответствии с международным стандартом ISO 14577. С учетом симметрии рассматривали половину сварного соединения. В соответствии с

Перв. примен.	Справ. №	Подпись и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата	Инв. № подл.					Лист
							Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	

инструментальными измерениями, ширина половины сварного шва была принята 0.6 мм. Для того чтобы учесть изменение нормального модуля упругости как по ширине, так и по высоте шва, модель сварного соединения задавали по группам элементов. Промежуточные значения модуля упругости получали путем линейной интерполяции по результатам экспериментов, усредненным вдоль линий сканирования. Помимо модуля упругости, задавали коэффициент Пуассона, равный 0.33. Причем в отличие от модуля упругости его считали постоянным по всей ширине сварного соединения. Сетку конечных элементов строили неравномерно со сгущениями вблизи точек сопряжения геометрических элементов (рисунок 2).

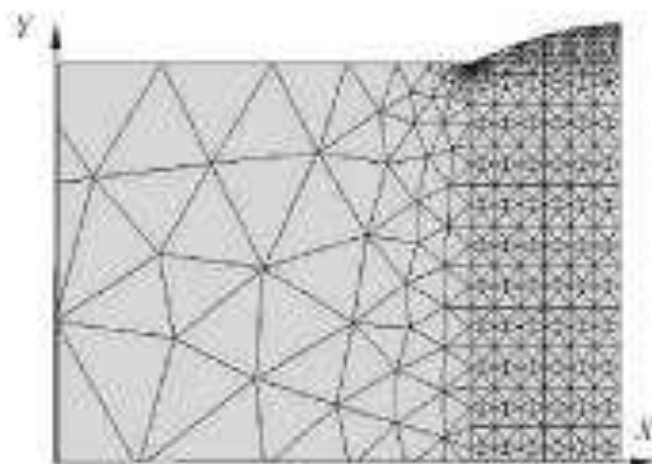


Рисунок 2- Конечно-элементная модель сварного соединения

Моделировали плоскую упругую деформацию растяжения-сжатия в направлении перпендикулярном сварному шву под действием давления ± 238 МПа, составляющего 0.9 от предела текучести основного металла.

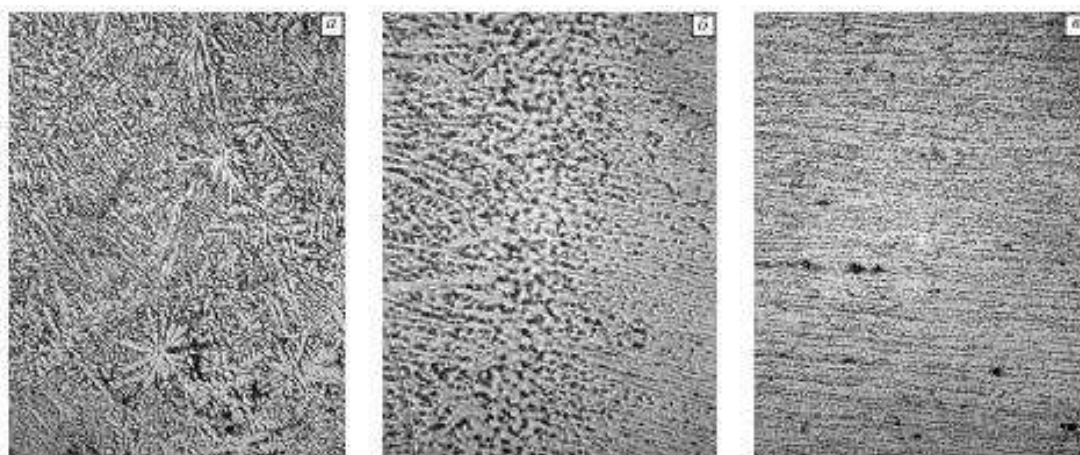


Рисунок 3 - Структура сварного шва (а), зоны термического влияния (б) и основного металла (в), Ч300

В результате расчетов получили распределение характеристик напряженно-деформированного состояния в плоскости поперечного сечения сварного шва. Для сравнения провели аналогичное моделирование процессов плоской деформации растяжения-сжатия сварного соединения при постоянном значении нормального модуля упругости, соответствующем основному металлу $E = 76$ ГПа.

1.2 Результаты и их обсуждение.

Основу сплава 01420 составляет α -твердый растворлегирующих элементов (главным образом, Li и Mg) в алюминии. Основной упрочняющей фазой является δ' - фаза Al_3Li с упорядоченной ГЦК-решеткой типа L12, частицы которой размерами 30 нм равномерно распределены по всему объему сплава. Кроме того, в сплаве присутствуют в небольшом количестве интерметаллиды железа $FeAl$, кремния и магния Mg_2Si , размеры частиц которых составляют 10–20 мкм. Ширина сварного шва в поперечном сечении 1.0–1.2 мм, ширина зоны термического влияния 2 мм. Микроструктура сплава и сварного шва показана на рисунок 3. Сварной шов имеет разориентированную дендритную структуру в центральной части (рисунок 3, а) и столбчатые дендриты вблизи зоны термического влияния (рисунок 3, б). При высокой скорости кристаллизации материала сварного шва успевает выделиться упрочняющая фаза δ' - фаза (рисунок 4). Размер частиц этой фазы в среднем составляет 10–15 нм (рисунок 4, б).

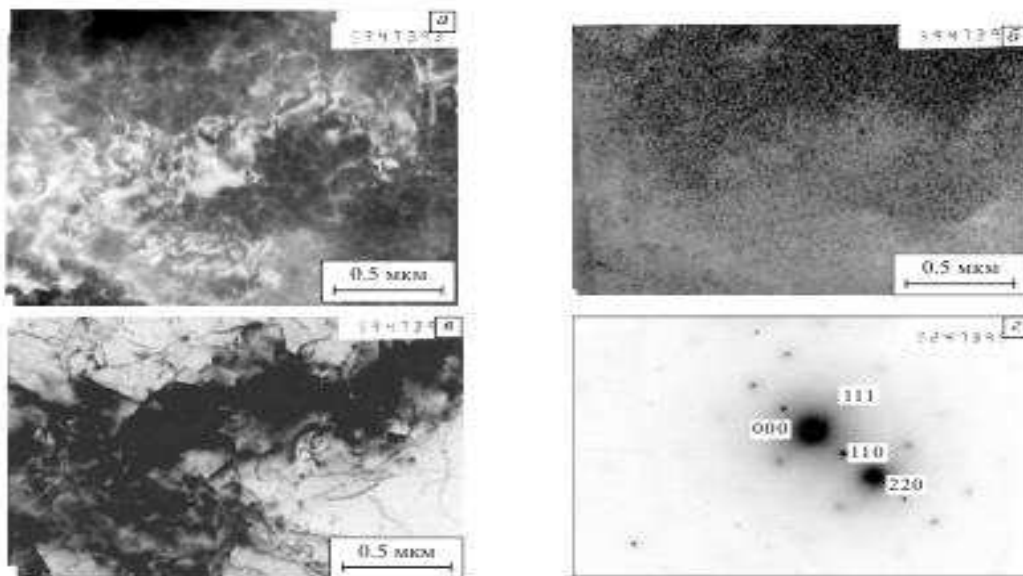


Рисунок 4 - Электронно-микроскопическое изображение сплава 01420 в зоне сварного шва.

На границе с нерасплавленным при лазерном воздействии материалом формируется зона мелких равноосных зерен шириной 20 мкм (рисунок 3, б). В

Перв. примен.

Справа. №

материале зоны термического влияния не зафиксирован существенный рост размера зерен, частично сохранилась текстура деформации исходного сплава, однако отмечено появление новых рекристаллизованных зерен размером 0.6 мкм. В материале зон термического влияния обнаружены равномерно распределенные частицы δ' -фазы, существенно отличающиеся по размерам: основная масса частиц имела размеры около 30 нм, как и в исходном сплаве, однако размер некоторых из них достигал 70 нм. Следует помнить, что при лазерной обработке скорости нагрева и охлаждения очень высоки (порядка 600–1000 °C/c), поэтому в зонах термического влияния изменения, связанные с нагревом, крайне небольшие, что проявилось и в незначительном снижении значений микротвердости (рисунок 5). Твердость исходного сплава 01420 выше, чем в зоне термического влияния и в сварном шве, причем минимальные значения твердости наблюдаются в центральной части сварного шва.

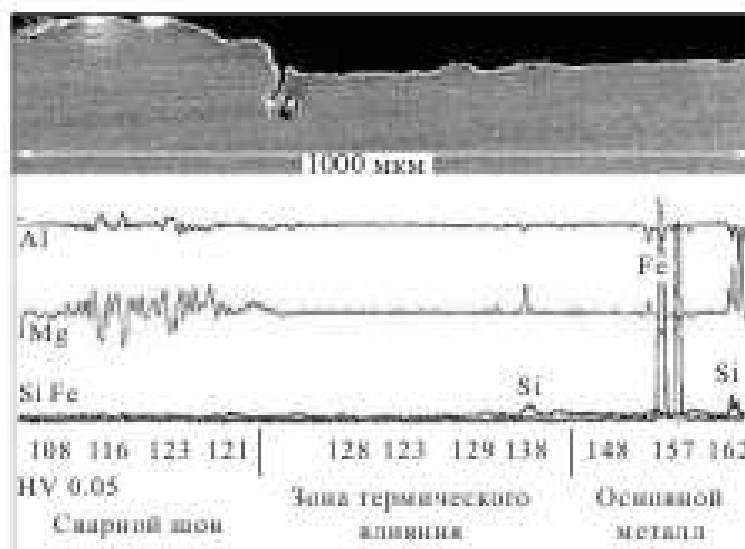


Рисунок 5 - Распределение элементов и микротвердости по ширине сварного соединения (линия сканирования отмечена белой линией).

На нетравленных образцах видны дефекты сварного шва в виде глобулей размерами 0.1–0.8 мм, концентрических прослоек (рисунок 6, а), которые располагаются в верхней части швов на границе с зоной термического влияния. По химическому составу они неоднородны: содержат оксиды Fe_2O_3 , MgO , SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , концентрические прослойки состоят преимущественно из оксидов SiO_2 с содержанием кремния до 23 масс. % (рисунок 6, а). В отдельных глобулярных включениях наблюдаются частицы другого цвета неправильной формы, состоящие практически из чистого железа. Его концентрация составила 98.2 масс. %, остальное: кремний — 0.09 масс. %, марганец — 0.05 масс. %, магний — 0.04 масс. %, алюминий — 0.25 масс. %. Наблюдаемые включения, вероятнее всего, образуются в процессе лазерной сварки в результате коагуляции мелких железосодержащих и кремнийсодержащих частиц, присутствующих в

Инв. № подл.

Подпись и дата

Взам. инв. №

Инв. № дубл.

Подпись и дата

Лист

БР – 15.03.02 ПЗ

8

Изм. Лист № докум. Подпись Дата

сплаве 01420.

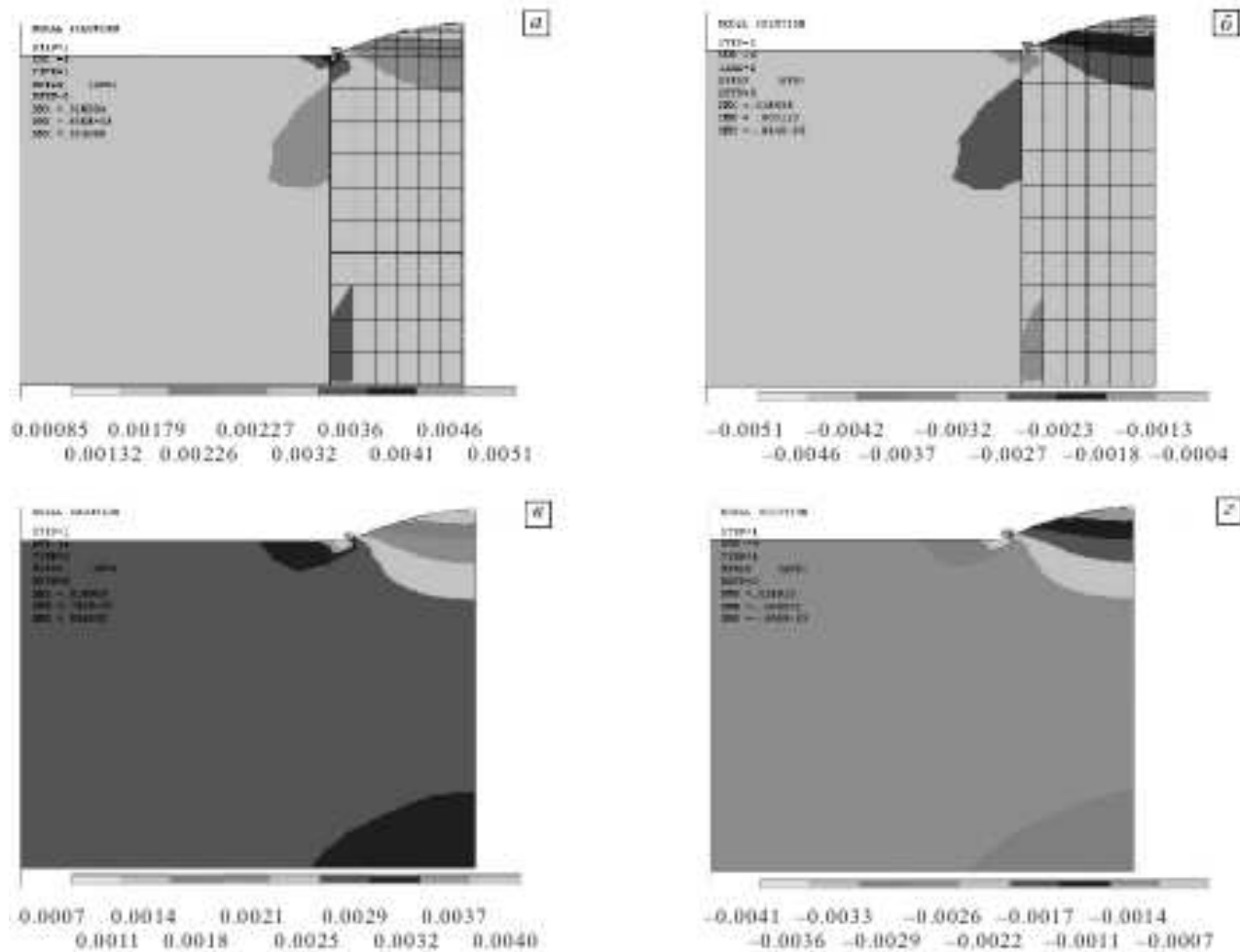


Рисунок 6 - Распределение деформации ϵ_{xx} в зоне сварного соединения: плоскодеформированное растяжение при переменном модуле упругости (а); плоскодеформированное сжатие при переменном модуле упругости (б); плоскодеформированное растяжение при постоянном модуле упругости (в); плоскодеформированное сжатие при постоянном модуле упругости (г).

Мелкие включения неправильной формы размером 10–30 мкм, равномерно расположенные по всему объему шва, практически не отличаются от частиц в самом сплаве 01420. Эти частицы металлографически отличаются по цвету (рисунок 6, б): часть светлых включений содержит железо в виде интерметаллида $FeAl$, вблизи таких включений наблюдается увеличение концентрации кремния; в другой группе светлых включений содержатся цирконий и титан-интерметаллид $Al_3(Zr, Ti)$; темные включения содержат кремний и магний в виде соединения Mg_2Si . Таким образом, полученные сварные соединения характеризуются структурной неоднородностью, которая определяет неравномерное распределение свойств по ширине швов. В отличие от твердости, модуль упругости не является структурно-чувствительной

Перв. примен.				
Справ. №				
Подпись и дата				
Инв. № дубл.				
Взам. инв. №				
Подпись и дата				
Инв. № подл.				
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
БР – 15.03.03 ПЗ				Лист
				9

Перв. примен.	<p>характеристикой, а определяется в основном параметрами кристаллической решетки и поэтому не меняет своего среднего значения в зоне термического влияния. Снижение модуля упругости металла в зоне сварного шва обусловлено меньшей его плотностью из-за наличия микропор, расположенных в междендритных пространствах. Поэтому для исследованного сварного шва корректней говорить об определении эффективных значений модуля упругости.</p> <p>Анализ расчетных данных показал, что при рассматриваемой геометрии сварного соединения амплитудные значения напряжений σ_{NN} и деформаций ϵ_{xx} вдоль оси нагружения имеют место на наружной поверхности в зоне сопряжения усиления сварного шва со свариваемыми листами. Причем они зависят от того, задавался ли при моделировании модуль упругости постоянным или учитывалось его фактическое распределение в сварном соединении. Так, например, если в первом случае амплитудные (предельные) значения деформации в цикле $\epsilon_{\epsilon x} = \pm 0.004$ (рис. 8, в, г), то во втором $\epsilon_{\epsilon x} = \pm 0.005$, т.е. учет неоднородности распределения модуля упругости увеличивает на 25 % расчетную величину амплитудной деформации.</p>					
Справ. №	<p>1.3 Зона термического влияния, граничащая с линией сплавления. Структурная неоднородность в зоне термического влияния.</p> <p>Процесс формирования соединения при сварке плавлением характеризуется мощным локальным термическим воздействием на ограниченные объемы металла, что приводит к появлению напряжений, деформаций изделия, способствует образованию неоднородности свойств металла шва и околошовной зоны, ухудшающих в конечном итоге служебные характеристики сварного соединения.</p> <p>В процессе наплавки зона термического влияния подвергается воздействию широкого диапазона температур, оказывающих влияние на свойства ее отдельных участков и структуру.</p> <p>Рассмотрим участок зоны термического влияния, граничащий с линией сплавления в интервале температур T_L и T_C.</p> <p>Наплавленный металл представляет собой многокомпонентные поликристаллические системы с существенной анизотропией свойств в макро- и микрообъемах.</p> <p>В процессе затвердевания наплавленного слоя возникают дефекты кристаллического строения, количество которых зависит от химического состава ванны и параметров режима.</p> <p>При наплавке последующих слоев предыдущие подвергаются воздействию высоких температур с большими градиентами. Это способствует интенсивному протеканию диффузионных процессов, приводящих к увеличению анизотропии наплавленного металла. Вследствие больших скоростей охлаждения участков, нагретых выше линии A_{c3} В процессе фазовых превращений в твердом состоянии</p>					
Подпись и дата						
Инв. № дубл.						
Взам. инв. №						
Подпись и дата						
Инв. № подл.						
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	<p>БР – 15.03.03 ПЗ</p>	<p>Лист 10</p>

возникает гамма метастабильных структур мартенситного типа, в различной степени склонных к вязкому течению под воздействием остаточных напряжений первого рода. Указанные процессы позволяют утверждать, что на прочность в процессе сварки после затвердевания будут оказывать существенное влияния технологические параметры наплавки.

Рассмотрим схему обогащения ликвирующей примесью оплавленных границ зерен в околошовной зоне (рисунок 7).

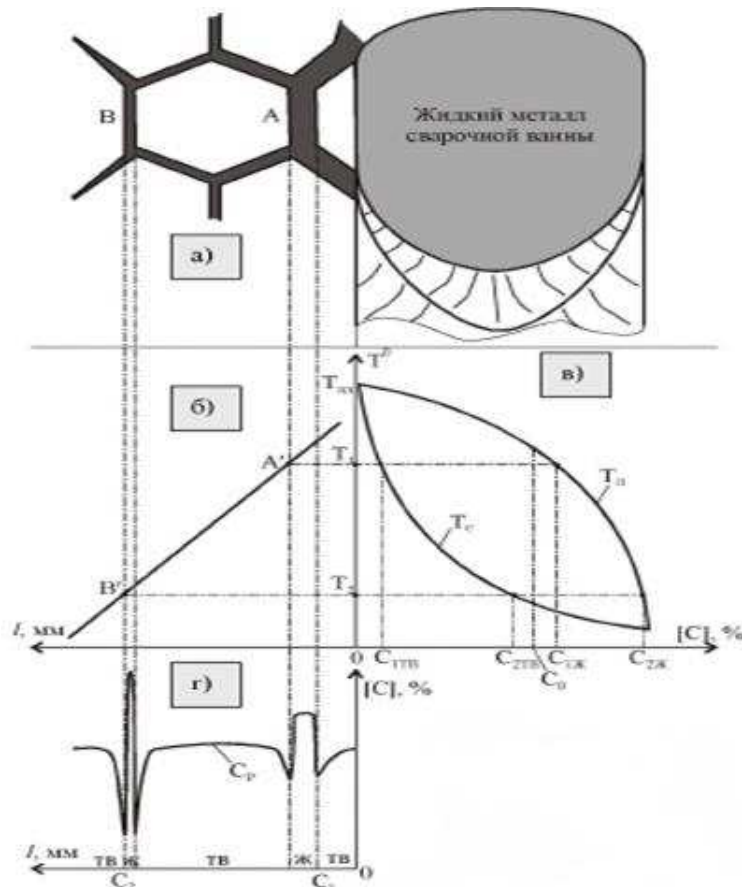


Рисунок 7 – Схема обогащения ликвирующей примесью оплавленных границ зерен в околошовной зоне

В зоне термического влияния границы зерна оплавлены (рисунок 7, а). В пределах зерна существует градиент температур, он изображен линией А·В (рисунок 7, б).

Если рассматриваемый сплав относится к ряду непрерывных твердых растворов, то на диаграмме состояния (рисунок 7, в) его состав будет соответствовать начальной концентрации легирующего элемента C_0 . Границы зерна А и В нагреты до температур T_1 и T_2 , находятся в интервале двухфазного состояния. В предельном случае концентрации легирующих элементов на оплавленных границах А и В достигнут значений $C_{1ж}$ и $C_{2ж}$ соответственно.

В соседних приграничных областях зерна, находящиеся в твердом состоянии, концентрации легирующего элемента будут составлять C_{1TB} и C_{2TB} . В

Перв. примен.	<p>центрах зерен концентрации легирующего элемента будет соответствовать расчетной кривой C_p. В первом приближении будем считать ее близкой к C_0.</p> <p>Очевидно, что по мере увеличения температуры выше линии солидуса толщина жидких прослоек по границам зерен будет увеличиваться. Кроме того, процессы диффузии в жидком состоянии протекают значительно быстрее чем в твердом. Поэтому с повышением температуры в интервале двухфазного состояния по мере увеличения толщины жидких прослоек избыточная концентрация легирующего элемента в них будет сначала резко возрастать, а затем убывать до конечного значения, равного среднему содержанию примеси в жидком расплаве при температуре ликвидуса.</p> <p>Из представленной схемы видно, что максимальная неоднородность оплавленных границ будет на некотором расстоянии от линии сплавления.</p> <p>В дальнейшем при охлаждении околошовной зоны сварного соединения будет происходить процесс кристаллизации оплавленных границ зерен и диффузионного перераспределения легирующих элементов в условиях уменьшения градиента температур и меньших скоростях охлаждения в сравнении со скоростями нагрева. При увеличении толщины жидкой прослойки по границам зерен происходит выравнивание состава по всему объему и снижение концентрации легирующего элемента $C_{1ж}$ и $C_{2ж}$. Поэтому распределение концентрации по границам (В и А) и телу зерна C_p (рисунок 7, г) может служить качественной кривой распределения избыточных концентраций легирующего элемента в жидкой фазе в момент, соответствующий началу охлаждения.</p> <p>Таким образом, к началу охлаждения на границе раздела твердой и жидкой фаз распределение легирующих элементов будет различным и существенно зависит от максимальной температуры нагрева.</p> <p>В процессе затвердевания и последующего охлаждения возможно некоторое снижение неоднородности, однако, учитывая большие скорости нагрева и охлаждения при сварке (наплавке), процессы выравнивания концентраций не достигают равновесия, что и обуславливает возникновение значительной неоднородности сварных соединений и неравновесности структур. Это приводит к процессам разупрочнения сварных соединений в процессе сварки, затвердевания металла сварного соединения и при его эксплуатации.</p>					
	Справ. №	<p>1.4 Механизм образования горячих трещин.</p> <p>Рассмотрим влияние структурной неоднородности на склонность наплавленного металла к горячим трещинам.</p> <p>В процессе наплавки вследствие большого градиента температур возникают усилия, превышающие предел текучести, и определенные части наплавленного валика испытывают значительные пластические деформации. Если деформации превышают предел пластичности, то образуются горячие (кристаллизационные) трещины.</p>				
Подпись и дата		Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
	Взам. инв. №					
БР – 15.03.03 ПЗ						12

Перв. примен.	<p>Рассмотрим механизм образования горячих трещин. Прочность и пластичность наплавленного металла существенно зависят от температуры (рисунок 8). Прочность тела зерна незначительно изменяется при температурах, близких к температуре плавления. Причем прочность межзеренных границ выше прочности тела зерна, поэтому деформации равномерно распределяется по всему объему и показатель пластичности оказывается высоким. С ростом температуры интенсивнее протекают релаксационные процессы, что увеличивает деформационную способность материала.</p> <p>При достижении температуры солидуса границы зерен начинают оплаиваться, их прочность резко уменьшается и становится меньше прочности зерна. Пластическая деформация локализуется по границе зерна, а показатель пластичности резко уменьшается.</p> <p>Эту точку называют нижней границей температурного интервала хрупкости – НГ ТИХ.</p> <p>По мере роста количества жидкой фазы увеличивается толщина жидкой прослойки по границам зерен и кристаллиты получают возможность взаимно перемещаться без заклинивания, что увеличивает пластичность. Эту точку называют верхней границей температурного интервала хрупкости – ВГ ТИХ. Интервал температур, обуславливающий низкую пластичность, называют температурным интервалом хрупкости – ТИХ.</p> <p>ТИХ определяется составом наплавленного металла, а также условиями охлаждения сварного соединения.</p> <p>Вследствие больших скоростей охлаждения при наплавке затвердевание металла шва протекает в неравновесных условиях, что увеличивает ТИХ и, соответственно, склонность к горячим трещинам.</p> <p>Рассмотрим процесс затвердевания сплава, состоящего из компонентов А и В и имеющего концентрацию C_0 легирующего элемента (рисунок 9).</p>				
	Справ. №				
Подпись и дата					
	Име. № дубл.				
Взам. инв. №					
Подпись и дата					
Име. № подл.					
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					БР – 15.03.03 ПЗ
					13

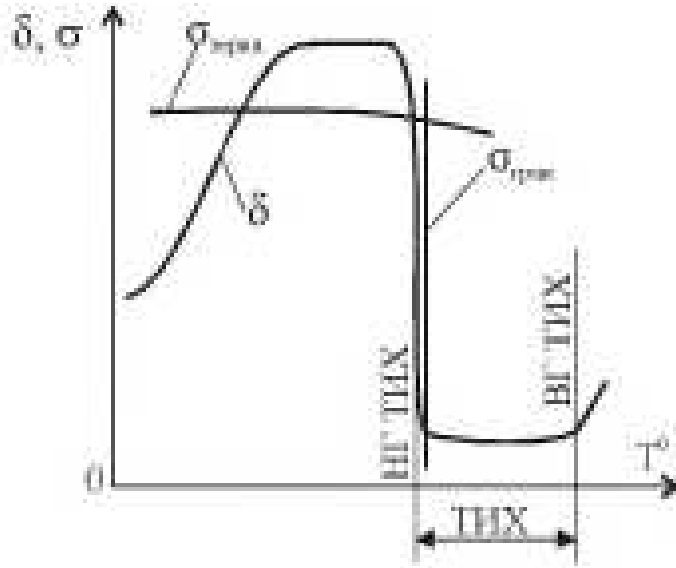


Рисунок 8 – Влияние температуры на прочность и пластичность наплавленного металла

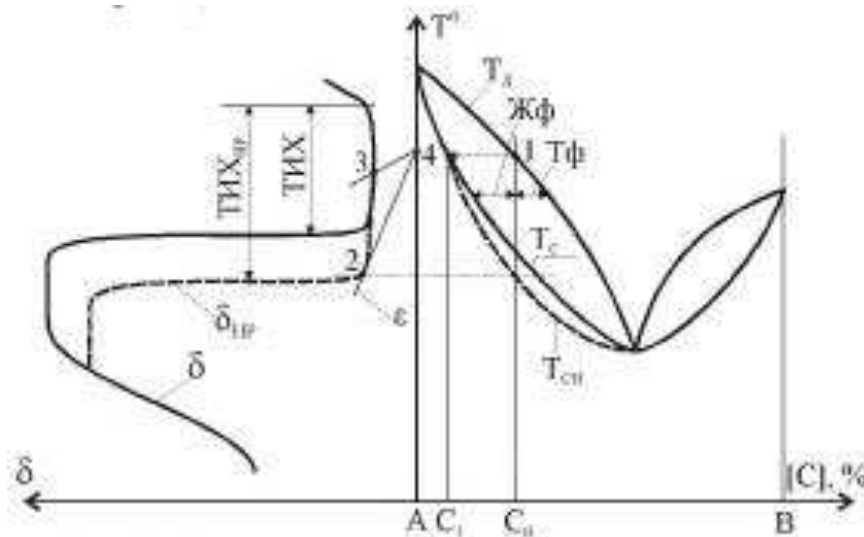


Рисунок 9 – Влияние неравновесности солидуса на увеличение склонности к горячим трещинам

При достижении температуры ликвидуса (точка 1) начинают кристаллизоваться порции металла с меньшей концентрацией легирующего элемента C_1 (см. рисунок 9), а его концентрация в расплаве увеличивается. Это приводит к снижению температуры солидуса и увеличению температурного интервала хрупкости $ТНХ_{нр}$. Количество жидкой и твердой фаз определяется правилом рычага. По мере роста кристаллитов образуется общий твердый каркас металла, в промежутках которого находится жидкая фаза. Начиная с этого момента кристаллиты теряют возможность поворота, заклинивают и начинается процесс накопления деформации усадки.

Если деформация усадки окажется меньше пластичности сплава, то разрушения не будет (рисунок 9, точка 2). Если деформация усадки превысит пластичность сплава, то возникают трещины (рисунок 9, точка 3).

Учесть теоретически все факторы, влияющие на склонность к горячим трещинам сложно, поэтому разработаны специальные методы, а также испытательные машины, позволяющие принудительно с различными скоростями деформировать свариваемые образцы. Чем большую скорость деформации выдерживает кристаллизирующийся металл шва, тем меньше вероятность образования горячих трещин.

При наплавке ленточным электродом использование стандартных машин конструктивно затруднено. Для оценки стойкости наплавленного металла к образованию горячих трещин в ОНИЛ наплавки разработана испытательная машина, позволяющая производить испытания металла, наплавленного ленточным электродом. В конструкции машины использована схема чистого изгиба (рисунок 10).



Рисунок 10 – Схема нагружения испытательной машины.

Для обеспечения равномерного изгиба пластины по ширине разработан редуктор с четырьмя силовыми винтами на выходе, которые, синхронно перемещая две траверсы, деформируют пластину. Скорость деформации регулируется изменением оборотов коллекторного электромотора постоянного тока.

Результаты исследований на склонность к горячим трещинам представлен на рисунке 11.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

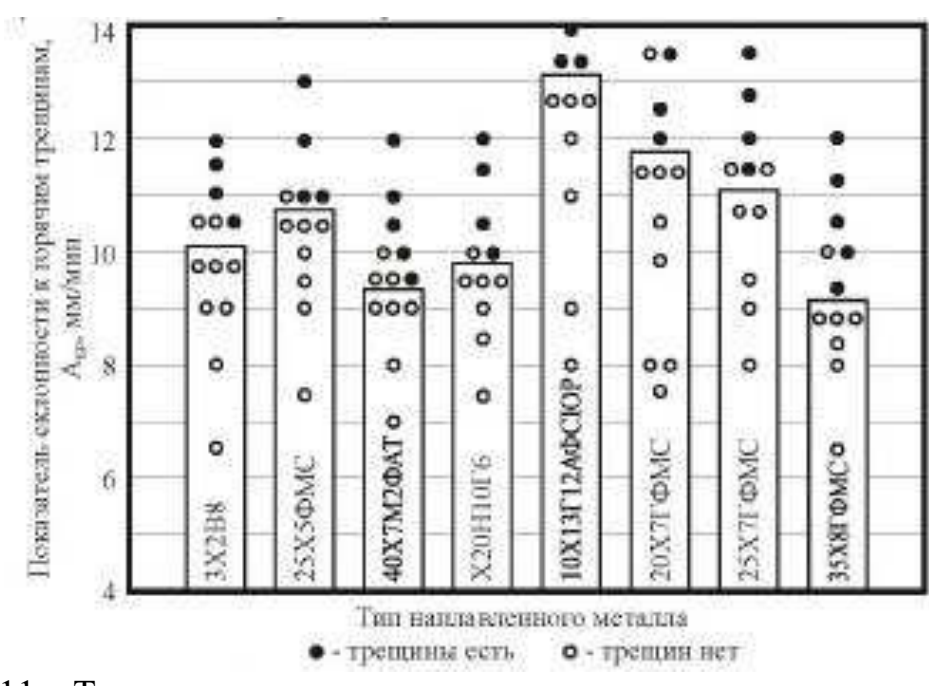


Рисунок 11 – Технологическая прочность сплавов в процессе кристаллизации при наплавке

Однако, испытания на склонность к горячим трещинам не позволяет определить распределение свойств в зоне термического влияния, так как разрушение всегда происходит по участку с минимальными свойствами.

Распределение прочности в зоне термического влияния исследовали на отдельных образцах подвергнутых нагреву по имитированным термическим циклам, соответствующим отдельным точкам зоны термического влияния. Образцы размером 3х6х40 мм из стали Х18Н10Т нагревали до различных максимальных температур в интервале 1200 – 1400 °С. Затем образцы испытывали на растяжение со скоростью перемещения захвата машины 0,0025 мм/мин при температуре 700°С. Результаты испытаний представлены на рисунок 12.

Справ. №	Перв. примен.
----------	---------------

Име. № подл.	Подпись и дата	Име. № дубл.	Подпись и дата	Взам. ине. №	Име. № дубл.	Подпись и дата
--------------	----------------	--------------	----------------	--------------	--------------	----------------

Перв. примен.
Справ. №

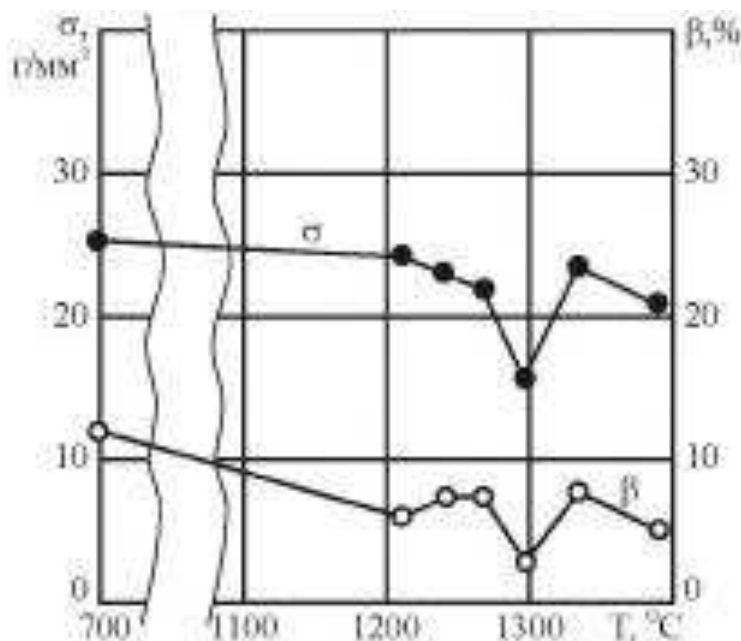


Рисунок 12 – Зависимость прочности от максимальной температуры термического цикла

Как видно из рисунка, провал прочности совпадает с линией солидуса (1300°C) этой стали. Выше этой температуры прочность увеличивается.

1.5 Связь между механическими характеристиками, определяемыми из опытов на растяжение, и пределом выносливости.

Развитие усталостной трещины, так же как и развитие трещины при однократном нагружении, происходит из линий пластических сдвигов. Таким образом, механизм разрушения при однократном и многократном нагружении в первом приближении можно считать одинаковым. Более низкую прочность при повторном нагружении по сравнению с однократным можно объяснить тем, что при многократном нагружении сдвиги, а следовательно, и пластические деформации сосредотачиваются лишь в отдельных небольших объемах (рисунок 13, в) образца, тогда как при однократном нагружении сдвиги распространяются на весь рабочий объем образца (рисунок 13, б). В результате этого разрушение при многократном нагружении начинается в пластически деформированных до предела отдельных небольших объемах образца при наличии большей части образца, которая подверглась нагружению лишь в пределах упругих деформаций. При однократном нагружении разрушение тоже может начаться в отдельных небольших объемах образца, но при условии, когда остальной объем образца претерпел пластическую деформацию, близкую к предельной. При таком механизме разрушения прочность при многократных нагрузках должна быть ниже, чем при однократном нагружении вследствие индивидуальности пластической деформации и разрушения при повторном нагружении.

Подпись и дата
Инв. № дубл.
Взам. инв. №
Подпись и дата
Инв. № подл.

Таким образом, можно считать, что разрушению металла от усталости предшествует накопление местных макросдвигов и, следовательно, появление местных пластических деформаций, исчерпание которых приводит к местному разрушению.

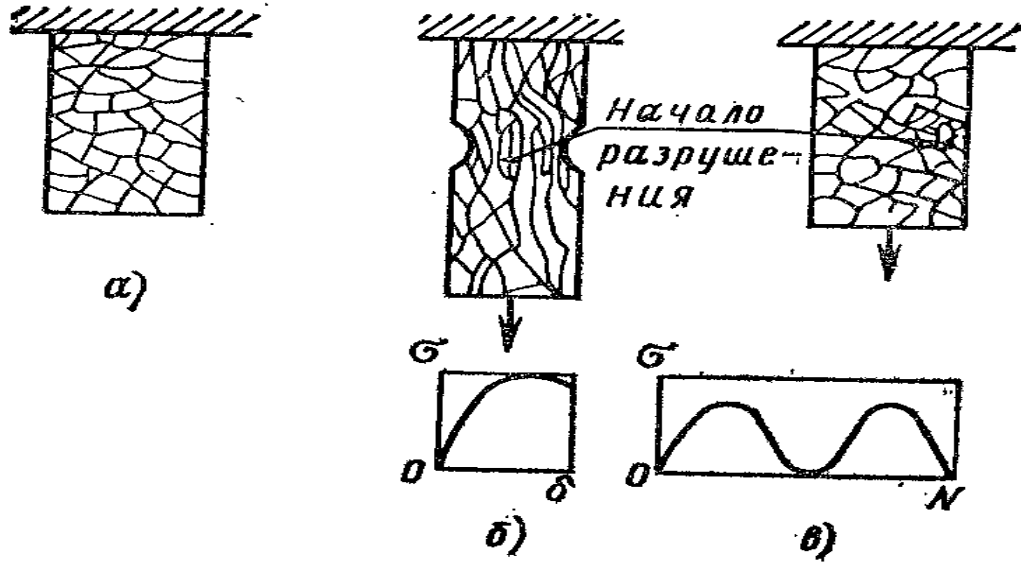


Рисунок 13. Схематическое представление о начале разрушения при однократно-возрастающей нагрузке и при циклическом нагружении:
 а – образец до испытания; б – образец, нагруженный однократно возрастающей нагрузкой в момент начала разрушения; в – образец циклически нагруженный в момент начала разрушения

Измерения микротвердости в местах разрушения образцов после однократного и многократного нагружения показали близкие значения твердости, что свидетельствует об одинаковых предельных пластических деформациях в месте разрушения при указанных видах нагружения.

Концентраторы напряжений могут вызывать большие местные напряжения при небольшом среднем напряжении, действующем на образец. Значительные местные напряжения могут привести при первом же нагружении к местной пластической деформации и дальнейшему накоплению деформаций такого вида, вплоть до полного использования запаса пластичности, и последующему местному разрушению, т.е. образованию усталостной трещины.

На процесс разрушения металла при циклических нагрузках, по-видимому, будут оказывать влияние предел упругости и предельная пластичность. Чем выше предел упругости, тем более высокое напряжение потребуется для возникновения остаточных деформаций в местах концентрации напряжений при первом нагружении; чем выше пластичность, тем большее время потребуется для полного использования запаса пластичности для того, чтобы произошло разрушение. Однако использование запаса пластичности будет зависеть от того, насколько рабочее напряжение выше предела упругости. С увеличением разницы

Перв. примен.	<p>между рабочим напряжением и пределом упругости исчерпание пластичности будет происходить быстрее.</p> <p>Процесс разрушения в местах концентрации напряжения зависит еще и от объема металла, вовлекаемого в пластическую деформацию в этом районе. Чем больший объем металла вовлекается в пластическую деформацию в местах концентрации напряжения, тем большую работу необходимо затратить для того, чтобы разрушить металл в этом месте.</p> <p>Причиной усталости металлов является выход его при первом нагружении за предел упругости в наиболее слабых небольших объемах. Если в слабых небольших объемах при первом нагружении пластические деформации не возникают, то нет оснований к разрушению материала, так как в этом случае в образце не будут накапливаться пластические деформации; металл при этих условиях не будет подвержен усталости.</p> <p>Эти соображения подтверждаются результатами испытания черных металлов, для которых характерен при определенных напряжениях выход кривой усталости практически на горизонтальный участок. Все, говорит о том, что сопротивление усталости зависит от механических свойств металла, вследствие чего можно считать связь между пределом выносливости и другими механическими характеристиками оправданной.</p>				
	Справ. №	<p>1. Формулы, которые устанавливают связь σ_{-1} с характеристиками сопротивления деформации σ_g и $\sigma_{0.2}$:</p> $\sigma_{-1} = 0,47\sigma_g \text{ (Лер)}; \sigma_{-1} = 0,285(\sigma_{0.2} + \sigma_g) \text{ (Штрибек)}; \quad (1.1)$ $\sigma_{-1} = 0,25(\sigma_{0.2} + \sigma_g) \text{ (Майлендер)} \quad (1.2)$ $\sigma_{-1} = 0,35\sigma_g + 122 \text{ (Жуков)} \quad (1.3)$			
Подпись и дата		<p>2. Формулы, которые устанавливают связь σ_{-1} с σ_g и $\sigma_{0.2}$, а также с характеристиками пластичности ψ и δ:</p> $\sigma_{-1} = 0,2(\sigma_{0.2} + \sigma_g) + 10\psi \text{ (Юнгер)}; \quad (1.4)$ $\sigma_{-1} = 0,175(\sigma_{0.2} + \sigma_g + 10\delta_{10} + 1000) \text{ (Леквис)}. \quad (1.5)$			
	Инв. № дубл.	<p>3. Формулы, которые устанавливают связь σ_{-1} с характеристиками сопротивления разрушению S_k:</p> $\sigma_{-1} = 0,25S_k \text{ (Герольд)}; \sigma_{-1} = 0,25S_k + 43 \text{ (Жуков)}, \quad (1.6)$ $\sigma_{-1} = 0,25\sigma_g(1 + 1,35\psi) \text{ (Марковец)} \quad (1.7)$			
Взам. инв. №		<p>В последней формуле S_k определяется косвенным путем по следующей формуле, куда в скрытом виде входит равномерная деформация $S_k = \sigma_g(1 + 1,35\psi)$. Эта формула применима для металлов с равномерным поперечным сужением $\psi_p \leq 15\%$.</p>			
	Подпись и дата	<p>К таким материалам относятся углеродистые, низколегированные стали перлитного класса, алюминиевые сплавы и др. Для сталей применяемых в Советском союзе, на рисунке 14, а-е сопоставлены σ_{-1} с другими механическими свойствами в соответствии с различными формулами.</p>			
Инв. № подл.					
	Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
БР – 15.02.02 ПЗ					Лист
					19

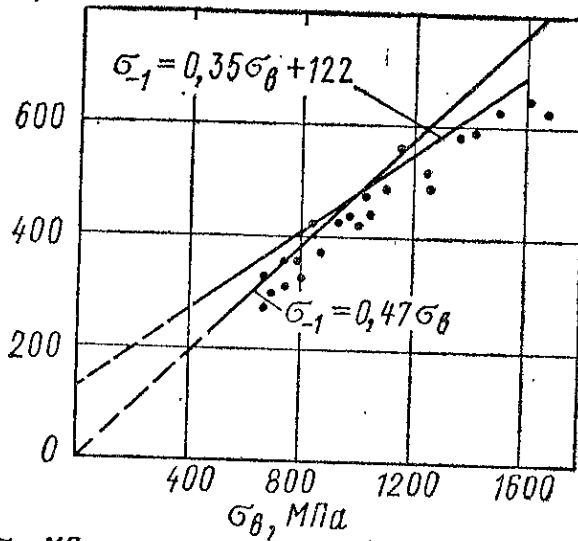
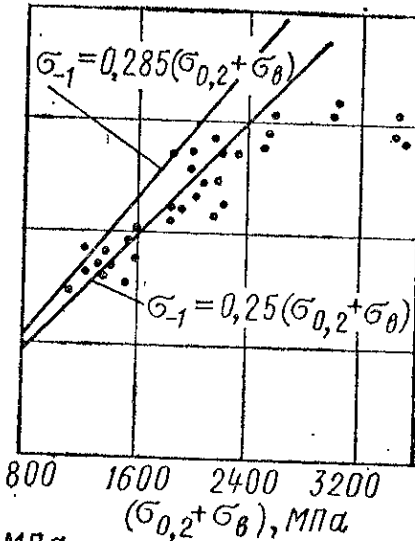
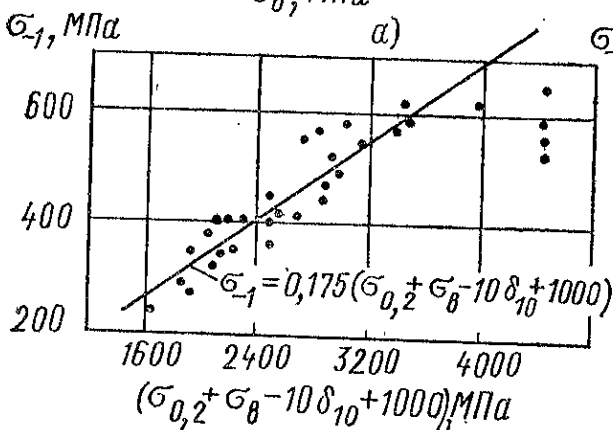
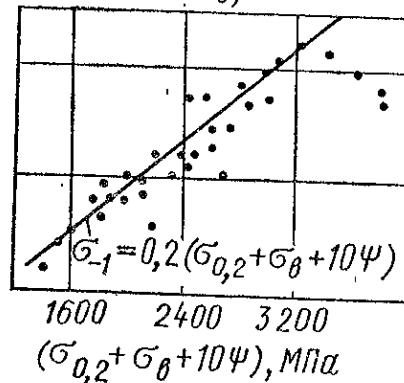
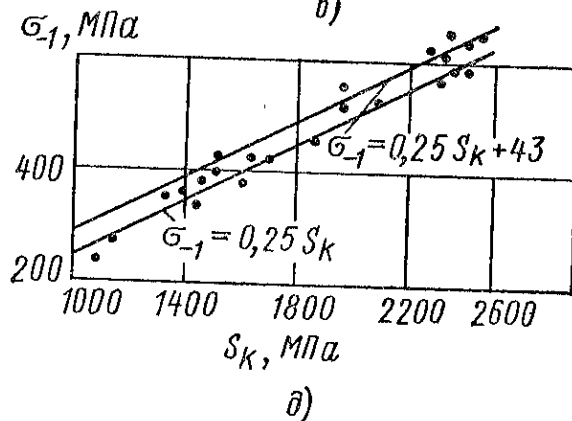
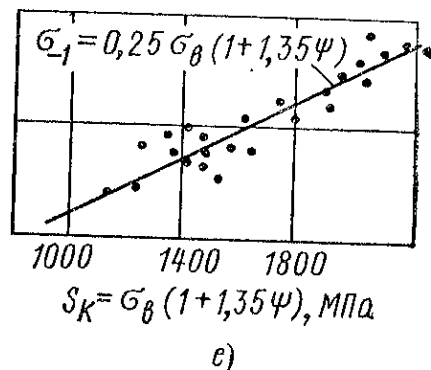
σ_{-1} , МПа σ_{-1} , МПа σ_{-1} , МПа σ_{-1} , МПа σ_{-1} , МПа σ_{-1} , МПа

Рисунок 14 – Механические свойства стали

Испытания на растяжение проводили по ГОСТ 1497-73, а на усталость – по ГОСТ 2860-65. Параметр шероховатости поверхности образцов для испытания

Перв. примен.	<p>на растяжение $R_a=0,63\div 0,32$ мкм, а для испытаний на усталость – $R_a=0,16\div 0,08$ мкм (ГОСТ 2789-73).</p> <p>Из графиков рисунка 14 следует, что для сталей с $\sigma_s \leq 1300$ Мпа максимальные отклонения от средней линии составляют $\pm 15\div 20\%$.</p> <p>Эти эксперименты говорят о возможности приближенного определения σ_{-1} по другим механическим характеристикам.</p> <p>- наиболее кучно вокруг усредненной линии ложатся экспериментальные точки на графике рисунка 14, д, что от основного металла. Особенность сварных соединений заключается в том, что механические свойства металла шва, околошовной зоны и основного металла разные. В связи с этим используют различные методы для оценки свойств металла сварного соединения, которые выражаются в следующем: Сваривают небольшие заготовки по технологии сварки изделия, из которых затем вырезают стандартные образцы, и по результатам этих испытаний судят о прочности сварного соединения;</p> <p>- для механических испытаний стандартные образцы вырезают из одной детали, отобранной от партии, и по свойствам этой детали судят и свойствах остальных. В связи с тем, что по стандартным образцам нельзя определить механические свойства вблизи от поверхности, пытались использовать микрообразцы. Однако это себя не оправдало вследствие трудности изготовления микрообразцов и большого влияния поверхностного наклепа, образуемого при резании, на механические свойства;</p> <p>- рассчитывают механические свойства металла шва и околошовной зоны по содержанию углерода, легирующих элементов и режиму сварки;</p> <p>- определяют механические свойства по результатам измерения твердости.</p> <p>Последний метод является наиболее простым и позволяет определять механические свойства на готовых изделиях без их повреждения. Кроме того, этот метод оценивает свойства на площадке диаметром около 1 мм, что весьма важно для оценки неоднородности свойств, которые наблюдаются в сварном соединении.</p> <p>При использовании метода твердости для контроля сварных соединений следует учитывать наличие в них деформированного и литого металла, а также иногда и остаточных напряжений.</p> <p>Связь между характеристиками твердости и прочности деформированных и литых металлов практически одинаковая, что упрощает использование метода твердости для контроля механических свойств металла сварных соединений. Возможность использования метода твердости была проверена на сварных соединениях паропроводов диаметром 273x36, 245x45 и 325x60 мм, изготовленных из жаропрочных сталей 12МХ, 12Х1МФ и 15Х1МФ. Из паропроводов вырезали темплеты длиной до 150-200 мм и толщиной 10-15 мм, на которых в различных зонах сварного соединения методом твердости определяли $\sigma_{от}$ и $\sigma_{0,2T}$ по ГОСТ 22761-77 и 22762-77.</p>				
	Справ. №				
Подпись и дата					
	Име. № дубл.				
Взам. име. №					
Подпись и дата					
Име. № подл.					
	Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
БР – 15.03.03 ПЗ					Лист 21

Из этих же сварных соединений изготавливали образцы диаметром 6 мм и длиной 30 мм для испытания на растяжение с определением $\sigma_{вр}$ и $\sigma_{0,2р}$ по ГОСТ 1497-73. По результатам испытания 35 различных сварных соединений паропроводов как в исходном состоянии, так и после различных сроков службы (до 220 тыс. ч) было произведено сопоставление указанных характеристик (рисунке 15)

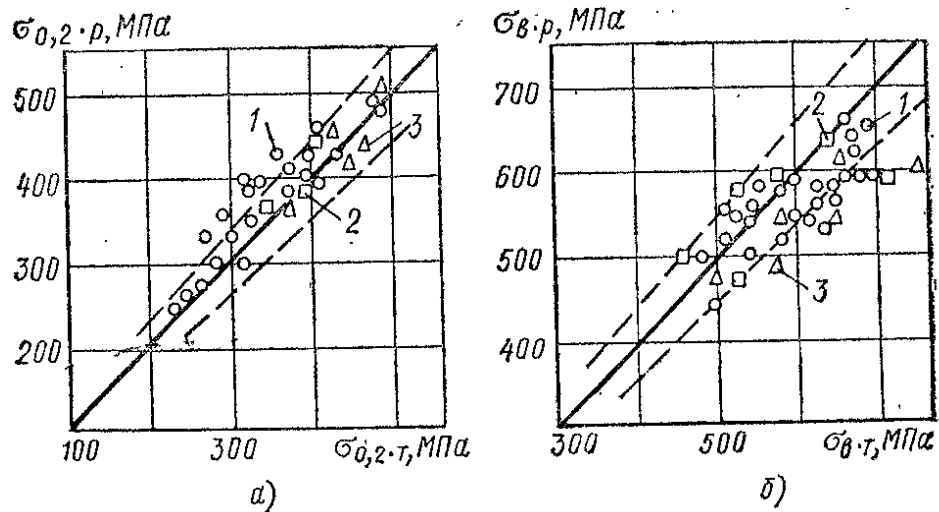


Рисунок 15. Графики сопоставления характеристик прочности металла сварных соединений паропровод из стали 12X1СФ(а) и 15X1М1Ф(б)

Большинство точек укладывается в 10%-ю полосу разброса (штриховые линии).

Выполненные исследования свидетельствуют о возможности использования метода твердости для контроля механических свойств сварных соединений.

2 Обзор по конструкциям и материалам

2.1 Обзор по конструкциям и материалам

В настоящее время в различных отраслях производства используется множество композиционных материалов. Термин «композиционный материал» применяется в материаловедении, машиностроении, самолетостроении, ракетостроении, медицине, электронике. Для того чтобы этот термин однозначно воспринимался специалистами из различных областей науки и техники, необходимо определить, что же понимается под композиционным материалом.

Композиционным материалом можно считать материал который состоит из каких-либо различных частей.

Перв. примен.	<p>Иногда к композиционным материалам относят конструкционные материалы с нанесенными на них защитными покрытиями. Так, например Доминик В. Росато считает, что композитами являются покрытие поливиниловой пленкой изделия, используемые в летательных аппаратах, ламинированные металлопластиковые облицовки и другие материалы и изделия подобного рода.</p> <p>Достаточно известно определение, согласно которому композиты – материалы, состоящие из двух или более компонентов. При этом предполагается, что компоненты, входящие в состав композита, должны быть хорошо совместимыми и не растворяться или иным способом поглощать друг друга.</p> <p>Широта толкования слова «композиционный» породила множество определений термина «композиционный материал». В широком смысле композиционный материал – это любой материал с гетерогенной структурой, т.е. со структурой, состоящей минимум из двух фаз. Такое определение позволяет отнести к КМ абсолютное большинство металлических материалов, поскольку они либо намеренно создаются многофазными, либо считаются однофазными, но в них есть неметаллические включения, Типичным примером гетерофазного металлического материала является сталь со структурой пластинчатого перлита, представляющего собой механическую смесь в виде пластин феррита и цементита. С учетом отмеченного определения полимерные материалы также можно отнести к композитам, поскольку кроме основного компонента(смолы) в них присутствуют различные наполнители, красители и др.</p> <p>Если проанализировать структуры окружающих нас материалов природного происхождения, то и их с учетом отмеченного определения можно отнести к КМ. Это касается материала костей человека и животных, древесины, различных минералов. Например, древесина представляет собой композицию из пучков целлюлозных волокон трубчатого строения, скрепленных матрицей из органического вещества – лигнина. Минерал нефрит состоит из игольчатых кристаллов, скрепленных между собой по поверхностям раздела.</p> <p>Впервые КМ начали создаваться задолго до появления понятия «композиционный материал». В качестве примеров можно назвать изготовленные из глины и упрочненные соломой кирпичи, предназначенные для постройки жилищ, или алебастр, армированный бычьим волосом.</p> <p>Первыми примерами научного подхода к созданию искусственных композиционных материалов считают появление железобетона и стеклопластиков. Железобетон относится к числу первых образцов армированной керамики. Этот композит состоит из бетона и стальной арматуры. Бетон отлично воспринимает сжимающие нагрузки и очень плохо сопротивляется растягивающим напряжениям. По этой причине перекрытия зданий нельзя изготавливать из обычного бетона, поскольку при воздействии на них внешней нагрузки неминуемо хрупкое разрушение конструкции. При сочетании бетона и металла в виде стальных прутков, определенным образом расположенных в изделии и хорошо воспринимающих растягивающие нагрузки, получается железобетон, соединяющий достоинства обоих компонентов.</p>					
Справ. №						
Подпись и дата						
Инв. № дубл.						
Взам. инв. №						
Подпись и дата						
Инв. № подл.						
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	БР – 15.03.03 ПЗ	Лист
						23

Для того чтобы как-то выделить КМ искусственного происхождения, подчеркнуть их характерные особенности предпринимались попытки дать более четкое научное определение, согласно которому к композитам относятся материалы, обладающие рядом признаков:

- состав, форма и распределение компонентов материала «запроектированы заранее»;
- материал не встречается в природе, а создан человеком;
- материал состоит из двух или более компонентов, различающихся по химическому составу и разделенных выраженной границей;
- свойства материала определяются каждым из его компонентов, которые в связи с этим должны присутствовать в достаточно больших количествах (больше некоторого критического содержания);
- материал обладает такими свойствами, которых не имеют его компоненты, взятые в отдельности;
- материал неоднороден в микромасштабе и однороден в макромасштабе.

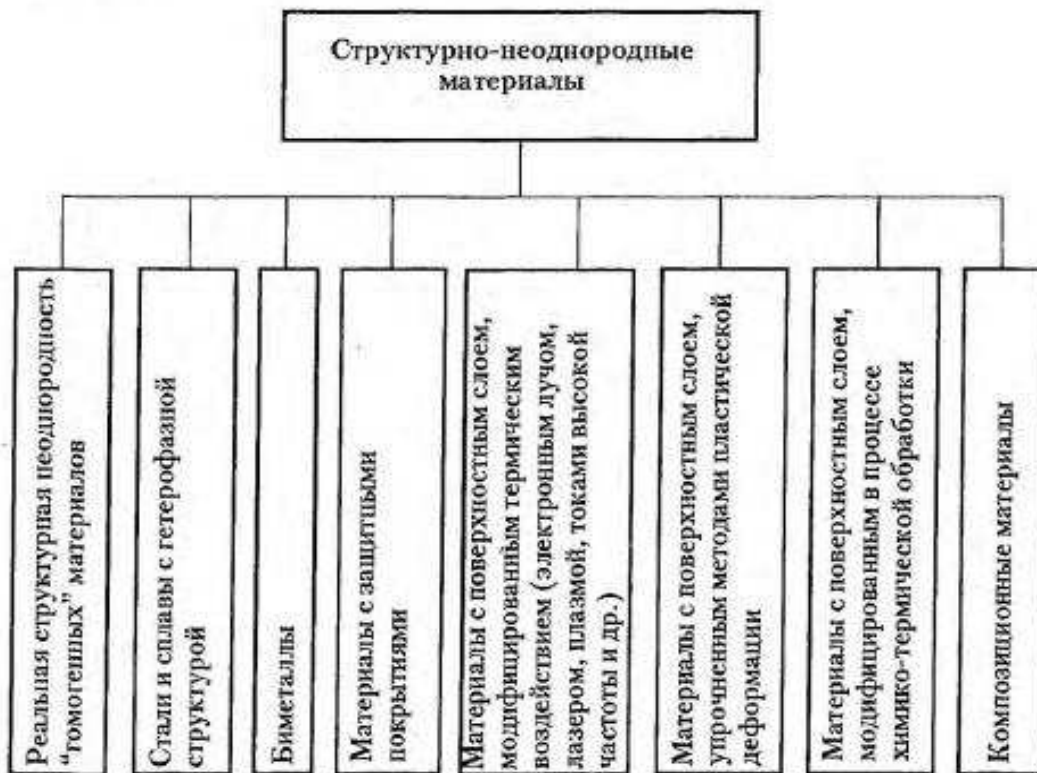


Рисунок 16. Виды структурной неоднородности в металлических материалах

Таким образом, композиционные материалы характеризуются рядом отмеченных выше признаков, в соответствии с которыми их следует особо выделять из широкой совокупности структурно-неоднородных материалов.

В настоящее время отрасли науки и производства, связанные с разработкой новых композиционных материалов, развиваются наиболее динамично. Специалистами разработано и исследовано огромное количество

композиционных материалов. Анализ перспектив развития производства композитов показывает, что в ближайшее время номенклатура этих материалов будет стремительно расширяться. Для того чтобы систематизировать КМ по различным признакам, грамотно реализовать процедуру выбора КМ для изготовления различных деталей, упорядочить терминологию в области материаловедения композитов, необходима обоснованная классификация этих материалов.

Единой общепринятой классификации композиционных материалов нет. Это объясняется рядом причин. Одна из них заключается в том, что КМ представляют самый широкий класс материалов, объединяющий металлы, полимеры и керамики. Современные технологии позволяют реализовывать различные, считавшиеся ранее экзотическими, сочетания исходных материалов. Разнообразие исходных материалов, сложность реальных структур в ряде случаев затрудняют классификацию получаемых композиционных материалов. К тому же вызывает трудности определение понятия «композиционный материал».

В настоящее время разработано несколько подходов к классификации композиционных материалов. Деление композитов может осуществляться по ряду признаков. Определенное влияние на классификацию материалов, естественно, оказывает и субъективный фактор.

Наиболее часто используется классификация композиционных материалов, в основу которой положено их деление по материаловедческому признаку. На рисунке 17 приведен один из наиболее простых вариантов разделения композитов по типу матричного материала. А соответствии с этой классификацией композиционные материалы делятся на полимерные, металлические, керамические, углерод-углеродные и гибридные. Гибридные композиты представляют собой материалы с матрицей смешанного типа.



Рисунок 17 - Классификация композиционных материалов

В основу классификации КМ, предложенной К.И. Портным и др., положены три признака:

- 1) геометрия компонентов композиционных материалов;

- 2) пространственное расположение компонентов (схема армирования);
- 3) природа компонентов композиционных материалов.

2.2 Классификация КМ по геометрии компонентов

По геометрии компонентов КМ подразделяются на три основные группы (рисунок 18):

- 1) материалы с нульмерными компонентами;
- 2) материалы с одномерными компонентами;
- 3) материалы с двумерными компонентами.

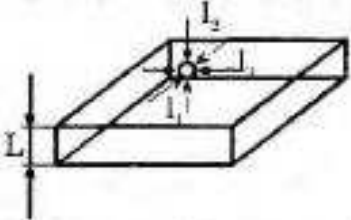
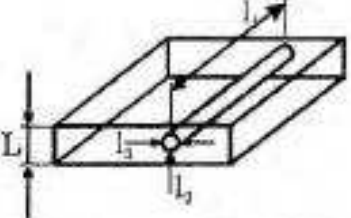
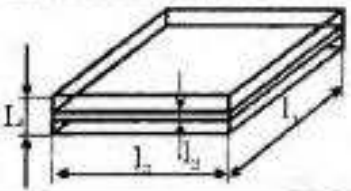
Наименование компонента	Геометрия компонента	Связи отношения размеров
Нуль-мерный		$\frac{l_1}{L} \ll 1; \frac{l_2}{L} \ll 1; \frac{l_3}{L} \ll 1$
Одномерный		$\frac{l_1}{L} \sim 1; \frac{l_2}{L} \ll 1; \frac{l_3}{L} \ll 1$
Двухмерный		$\frac{l_1}{L} \sim 1; \frac{l_2}{L} \ll 1; \frac{l_3}{L} \sim 1$

Рисунок 18. Классификация композиционных материалов по геометрии компонентов

Классификация КМ по данному признаку основана на понятии элементарного образца КМ, т.е. такого минимального объема материала, который характеризуется всем комплексом основных признаков КМ. В самом общем случае элементарный образец КМ должен иметь все три размера, существенно превосходящие минимальный размер компонентов.

В КМ с нульмерными компонентами все три размера компонента являются величинами одного и того же порядка. Нульмерные компоненты не имеют ни одного размера, соизмеримого с характерным размером элементарного образца КМ. В качестве примеров композитов такого типа можно привести дисперсно-упрочненные сплавы, металлы и сплавы, армированные частицами и материалы

Перв. примен.	<p>на основе керамики, содержащие короткие нитевидные кристаллы, длина которых много меньше характерного размера элементарного образца.</p> <p>КМ с одномерными компонентами содержат армирующие компоненты, один из размеров которых значительно превышает два других размера и соизмерим с характерным размером элементарного образца КМ. Примеры КМ этой группы: волокнистые композиционные материалы на основе металлов и полимеров, армированные керамическими, борными, углеродными, стеклянными волокнами.</p> <p>КМ с двумерными компонентами содержат компоненты, имеющие два размера, значительно превосходящие третий размер и соизмеримые с характерным размером элементарного образца КМ. Примерами композиционных материалов этой группы являются слоистые КМ, состоящие из чередующихся слоев титана и алюминия и их сплавов.</p> <p>Для обозначения нульмерных, одномерных и двумерных компонентов приняты соответствующие: 0,1,2.</p> <p>Кроме КМ с нульмерными, одномерными и двухмерными компонентами созданы комбинированные КМ, содержащие два или три компонента различной размерности. Примером такого КМ может служить пластик на основе эпоксидной смолы, армированный углеродными волокнами(одномерный компонент) и короткими нитевидными кристаллами карбида кремния(нульмерный компонент)</p>								
	Справ. №	<p>2.3 Классификация КМ по расположению компонентов</p> <p>а) По расположению компонентов, т.е. по схеме армирования КМ делятся на три группы (рисунок 19):КМ с одноосным (линейным) расположением армирующего компонента. В этих КМ армирующие компоненты в виде волокон или ориентированных цепочек нитевидных кристаллов располагаются в матрице параллельно друг другу, что достигается с помощью нульмерных или одномерных компонентов. Обозначение этой схемы следующее: 0:0:0 и 1:0:0(нульмерный 0 и одномерный компонент расположен вдоль оси x);</p> <p>б) КМ с двухосным (плоскостным) расположением армирующего компонента. Армирующие компоненты в виде волокон, фольг, матов из нитевидных кристаллов расположены в матрице в плоскостях, параллельных друг другу. Такая схема армирования создается с помощью нульмерных, одномерных, или двухмерных компонентов и обозначается 0:0:0, 1:1:0 и 2:2:0 соответственно(компоненты расположены в плоскостях ху);</p> <p>в) КМ с трехосным(объемным) расположением компонентов. В этой схеме армирования невозможно выделить одно или два преимущественных направления в материале. Такая схема может быть реализована с помощью нульмерных(0:0:0) или одномерных(1:1:1) компонентов.</p> <p>На рисунке 19. показаны схемы армирования композиционных материалов компонентами одинаковой размерности(нульмерными,одномерными или</p>							
Подпись и дата		Име. № дубл.	Взам. име. №	Подпись и дата	Име. № подл.				
					БР – 15.03.03 ПЗ				Лист 27
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

двухмерными). Для комбинированных КМ, т.е. материалов, армированных одновременно компонентами различной размерности, возможны следующие сочетания компонентов: 0+1;0+2;1+2;0+1+2. Наиболее сложные варианты армирования комбинированных композиционных материалов показаны на рисунке 20.

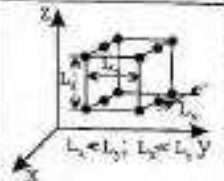
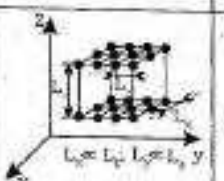
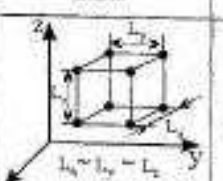
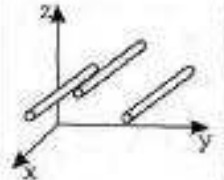
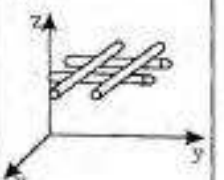
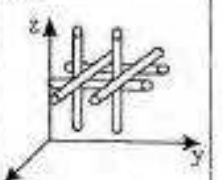
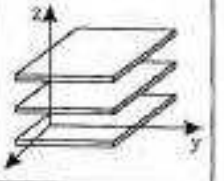
Геометрия компонента		Расположение компонентов					
Наименование	Обозначение	Одноосное (линейное)		Двухосное (плоскостное)		Трёхосное (объёмное)	
		Схема	Обозначение	Схема	Обозначение	Схема	Обозначение
Нульмерный	0		0:0:0		0:0:0		0:0:0
Одномерный	1		1:0:0		1:1:0		1:1:1
Двухмерный	2	—	—		2:2:0	—	—

Рисунок 19 - Классификация композиционных материалов по расположению компонентов (по схеме армирования)





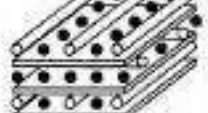
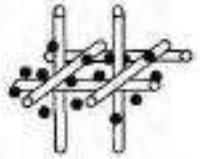
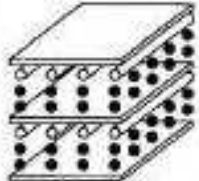
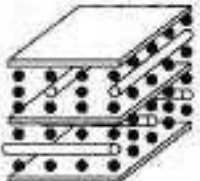
Расположение компонента	Комбинация компонентов			
	0,1	0,12	1+2	0,1+2
Одноосное		—	—	—
Двухосное				
Трёхосное			—	

Рисунок 20 - Классификация комбинированных композиционных материалов по видам сочетаний и расположению компонентов

2.4 Классификация КМ по природе компонентов

По природе компонентов КМ делятся на группы по количеству компонентов (например, на две группы – по природе матрицы и по природе армирующего компонента). Каждая группа, в свою очередь, делится на четыре подгруппы, имеющие компоненты из:

- металлов и сплавов;
- неметаллических материалов (например, углерода);
- неорганических соединений (окислов, карбидов, нитридов и т.п.);
- органических соединений.

В соответствии с этим признаком композиционный материал углерод-углерод относится по природе матрицы к группе КМ с матрицей из неметаллических элементов, по природе армирующего компонента – к группе КМ со вторым компонентом из неметаллических элементов. Углепластики относятся по природе матрицы к группе КМ с матрицей из органических соединений, по природе армирующего компонента – к группе КМ со вторым компонентом из неметаллических элементов. Дополнениями к рассмотренным группам являются полиматричные и полиармированные КМ. Полиматричные КМ состоят из чередующихся слоев двух или более КМ с матрицами различного химического состава (рисунок 21)

Полиармированные КМ содержат два или более различных по составу армирующих компонента, равномерно распределенных в матрице (рисунок 21);

Полиармированные КМ могут быть «простыми», если содержат армирующие компоненты различной природы, но одинаковой размерности, и комбинированными, если содержат армирующие компоненты различной размерности и различной природы. Например, стеклоуглепластик является простым полиармированным КМ, а бороалюминий с прослойками из титановой фольги – комбинированным полиармированным КМ.

Разделять композиционные материалы по другим признакам авторы данной классификации считают нецелесообразным.

Ниже приводится трактовка принципов классификации КМ, изложенных в работах Д.М. Карпиноса и др.

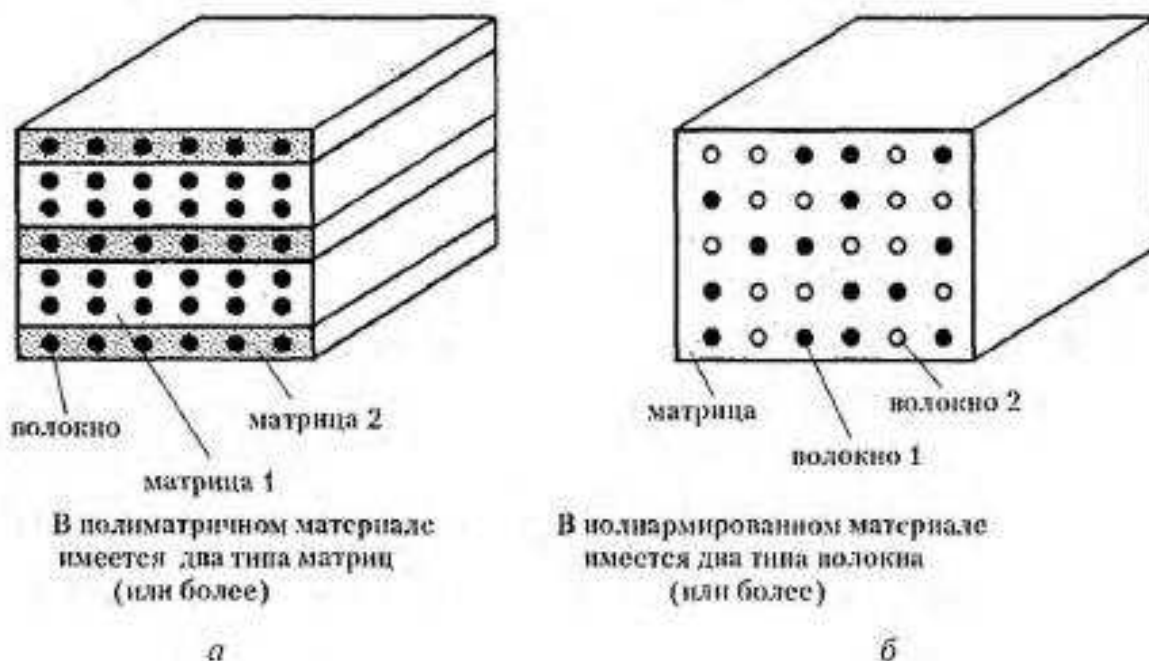


Рисунок 21. Примеры композиционных материалов

2.5 Классификация КМ по материалу матрицы (материаловедческий принцип)

Общее название КМ, как правило, происходит от материала матрицы. КМ с металлической матрицей называют металлическими композиционными материалами, с полимерной матрицей – полимерными композиционными материалами, с неорганической – неорганическими композиционными материалами. КМ, содержащие два и более различных по составу матричных материала, называют полиматричными.

Название полимерных КМ обычно состоит из двух частей. В первой части называется материал волокна, во второй приводится слово «пластик», или «волокнит». Например, ПКМ, армированные стекловолокном, называются стеклопластиковыми, или стекловолокнистыми. Если при изготовлении ПКМ

Перв. примен.	<p>использовали металлические волокна, КМ называют металлопластиком (металловолокнитом). Соответственно композиционные материалы носят такие названия, как органопластики, боропластики, углепластики, асбопластики.</p> <p>Для характеристик металлических композиционных материалов чаще используют двойное обозначение: вначале пишут материал матрицы, затем – материал волокна. Например, обозначение медь-вольфрам соответствует композиционному материалу, в котором матрицей является медь, а волокнами – вольфрам.</p> <p>Для неорганических КМ характерно такое же обозначение, как и для МКМ, т.е. в двойном наименовании первое слово относится к матрице, а второе – к волокну. Например, обозначение окись алюминия – молибден соответствует композиционному материалу с матрицей из окиси алюминия и молибденовыми волокнами.</p> <p>В некоторых случаях для обозначения КМ используется одно сложное слово, например бороалюминий или углеалюминий. В этом случае первая часть слова соответствует материалу волокна, а вторая – материалу матрицы.</p> <p>Еще разделяют на классификацию КМ по: геометрии армирующих элементов; по структуре и расположению компонентов; схеме армирования; методам получения; назначению.</p>				
Справ. №	<p>2.6 Методы определения механических свойств композиционных материалов</p> <p>Основными механическими свойствами композиционных материалов являются хорошо известные стандартные параметры, такие как предел прочности и модуль Юнга при растяжении и сжатии, предел прочности и модуль сдвига, коэффициент Пуассона. Особенности строения композиционных материалов предъявляют некоторые специфические требования к форме и размерам образцов, схемам их нагружения. В данном разделе обсуждаются некоторые из этих схем.</p> <p>Испытания композиционных материалов на растяжение.</p> <p>Испытание материалов на растяжение – традиционный вид механических испытаний. Растяжение композиционных материалов в направлении главных осей симметрии позволяет определить модули упругости, пределы прочности и коэффициенты Пуассона в этих направлениях.</p> <p>При испытании на растяжение композитов с ориентированной структурой, в отличие от изотропных материалов, в значительной степени проявляется концевой эффект, связанный с неравномерным распределением напряжений по длине образца. По этой причине приходится значительно увеличивать длину рабочей части образца.</p> <p>Для проведения испытаний на одноосное растяжение используют плоские и трубчатые образцы. Плоские образцы по форме можно разделить на полоски и двусторонние лопатки.</p>				
Подпись и дата	<p>Изм. Лист № докум. Подпись Дата</p>	Име. № дубл.	Взам. ине. №	Подпись и дата	Име. № подл.
БР – 15.03.03 ПЗ					Лист 31

Перв. примен.

Справ. №

Подпись и дата

Име. № дубл.

Взам. ине. №

Подпись и дата

Име. № подл.

Образцы в виде двусторонних лопаток (рисунок 22, а) характеризуются меньшей вероятностью разрушения в местах крепления и, таким образом, в большей степени гарантируют разрушение в пределах рабочей части. Образцы такого вида рекомендуют использовать для проведения испытаний композитов на растяжение перпендикулярно к слоям арматуры.

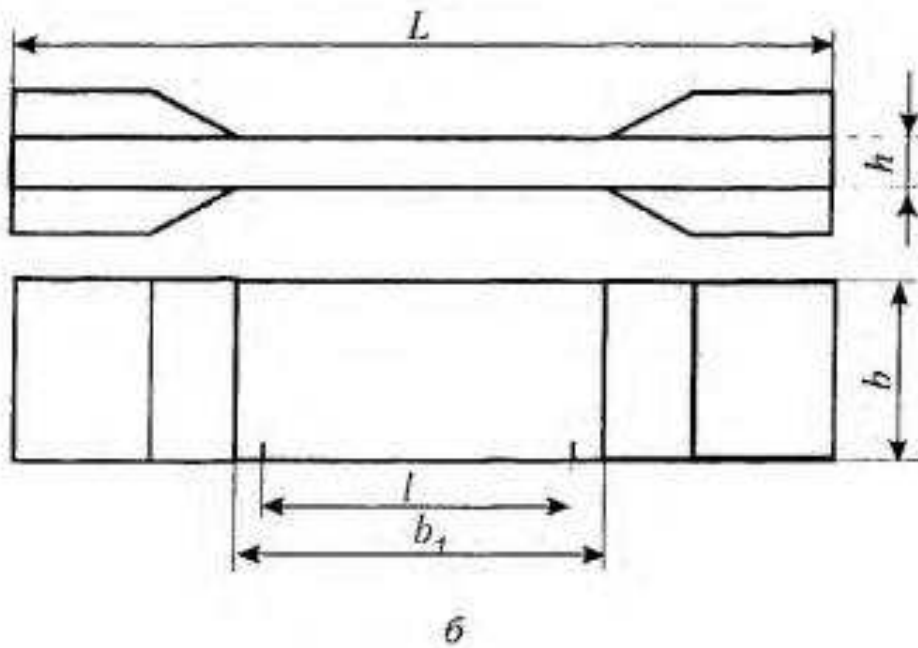
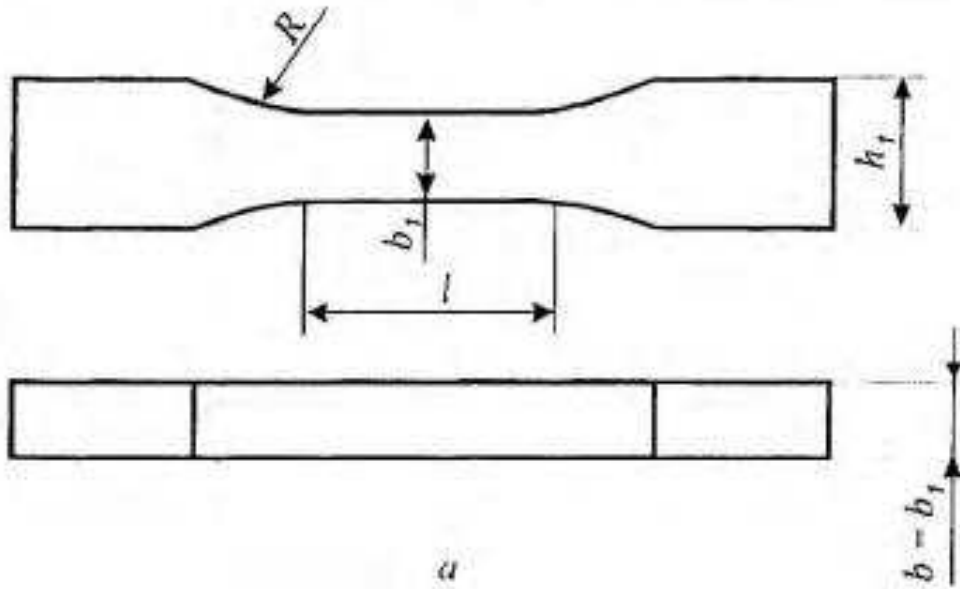


Рисунок 22 - Образцы для испытаний на растяжение: а – лопатка, б – полоска с накладками

Образцы в виде полосок (рисунок 22, б) используют при испытаниях с нагружением вдоль направления армирования. Основным недостатком образцов

такого типа является сложность надежного закрепления полоски в захватах разрывной машины. Это связано с тем, что при малой длине и ширине образца наблюдается его проскальзывание или раздавливание в захватах машины растяжения. Для устранения этих недостатков к полоске приклеивают накладки из материала с большей пластичностью и меньшей жесткостью, чем испытуемый материал.

При испытаниях композиционных материалов на растяжение следует избегать изгиба образцов. С этой целью в головках образцов сверлят отверстия и вставляют центрирующие пальцы (рисунок 23). Одновременно центрирующие пальцы устраняют проскальзывание образца относительно захватов испытательной машины.

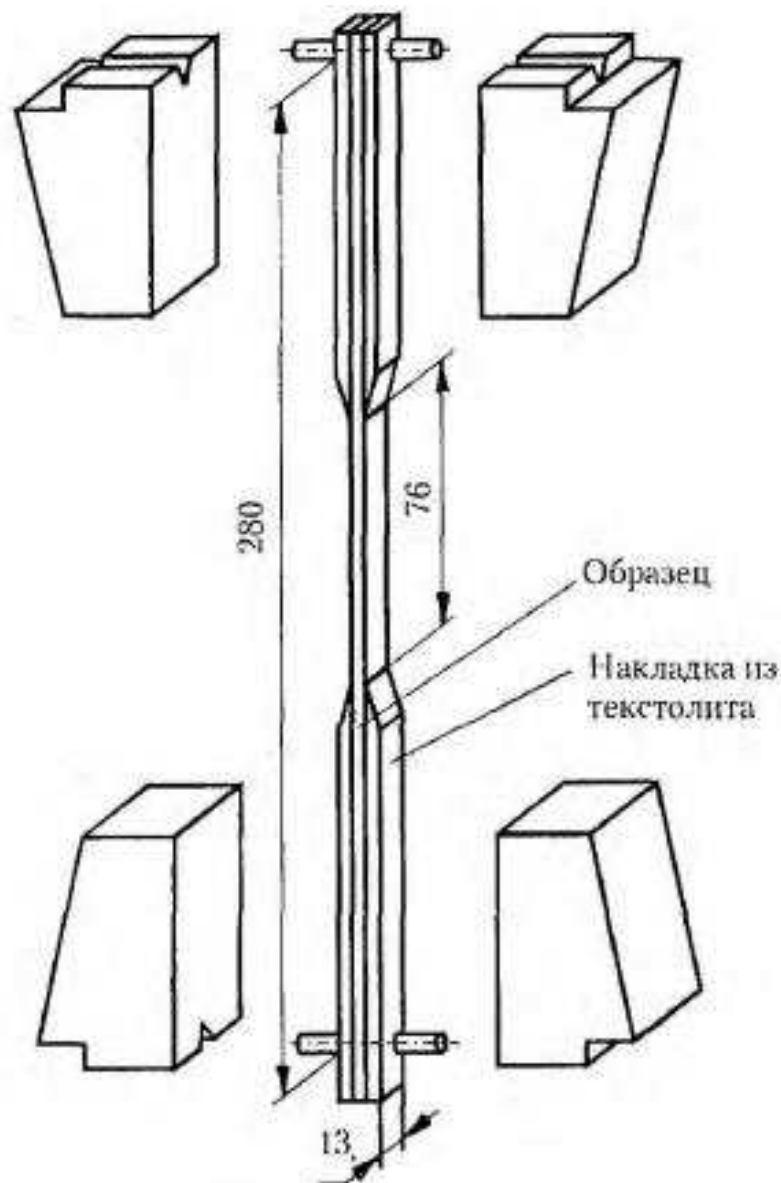


Рисунок 23 - Крепление образца при помощи фиксирующих пальцев, опирающихся на пазы захватов

На результаты механических испытаний значительное влияние оказывает направление укладки волокон. Под действием растягивающих напряжений многослойный композиционный материал, в зависимости от угла укладки волокон по отношению к растягивающим напряжением, испытывает не только линейные, но и сдвиговые деформации.

Зачастую используют трубчатые образцы, которые при определенных допущениях можно рассматривать как образцы бесконечной ширины.

Результаты осевого растяжения трубчатых и плоских образцов часто не совпадают.

2.7 Механика усталостного разрушения трещин

В механике усталостного разрушения (механике трещин) параметрами разрушения, характеризующими напряженно – деформированное состояние у вершины трещины упругого тела и контролирующими закономерностями ее роста, служат коэффициент интенсивности напряжений K и коэффициент асимметрии цикла нагружения $R=K_{min}/K_{max}$. Параметр механики разрушения K учитывает величину и способ приложения нагрузки, форму и размеры образца и трещины. Таким образом, для анализа закономерностей усталостного разрушения на стадии роста трещины вполне достаточно использовать зависимость ее скорости dl/dN от размаха $\Delta K = (1-R)K_{max}$ коэффициента интенсивности напряжений:

$$\frac{dl}{dN} = V = f(K_{max}, K_{min} / K_{max}, C, m) \quad (2.1)$$

где l – длина распространяющейся усталостной трещины, N – количество циклов нагружения, C и m – некоторые константы.

Графическое представление зависимости скорости роста усталостной трещины от параметра разрушения называется кинетической диаграммой усталостного разрушения. Параметрами кривой скорости роста усталостной трещины, по которым ее можно воспроизвести, являются характеристики циклической трещиностойкости, количественно выражающие сопротивление материала росту трещины в разных диапазонах его скоростей. Кинетическая диаграмма, полученная в результате основных испытаний образцов с трещиной, является базовой. Типичная Базовая КДУР (рисунок 24), построенная в логарифмической шкале по обеим осям, ограничивается пороговым коэффициентом интенсивности напряжений, ниже которого трещина не растет, и критическим коэффициентом интенсивности напряжений цикла, при достижении которого наступает долом образца. На практике определяют условное значение

Перв. примен.

Справ. №

Подпись и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

порогового коэффициента интенсивности напряжений, соответствующее базисной скорости роста усталостной трещины V_{th} , равной 10^{-10} м/цикл. Условно КДУР можно представить в виде участков: среднего участка 2, аппроксимируемого прямой и крайних криволинейных участков низких и высоких – скоростей роста трещины.

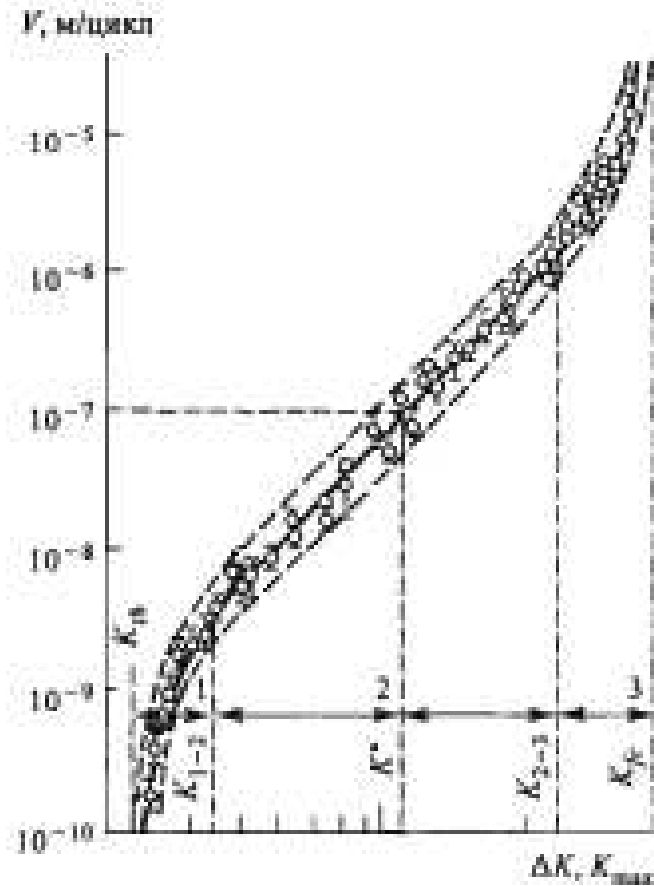


Рисунок 24. Кинетическая диаграмма усталостного разрушения

Скорость роста усталостных трещин зависит от многих факторов. Среди этих факторов можно отметить следующие: механические, металлургические, физико-химические и геометрические размеры тела. Тем не менее кинетические диаграммы усталостного разрушения имеют большое практическое значение исходя из них устанавливают характеристики циклической трещиностойкости, на их основании выбирают материал конструкций и оптимизируют технологию изготовления материалов; оценивают условия эксплуатации, безопасный ресурс и живучесть поврежденных трещинами конструкций; анализируют причины разрушения конструкций.

Лист

БР – 15.03.03 ПЗ

35

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

3 Расчет напряжений методом конечных элементов в программном комплексе Solidworks

3.1 Основы метода конечных элементов

Метод конечных элементов (МКЭ) – это метод приближённого численного решения физических задач. В его основе лежат две главные идеи: дискретизация исследуемого объекта на конечное множество элементов и кусочно-элементная аппроксимация исследуемых функций. Историческими предшественниками МКЭ были различные методы строительной механики и механики деформируемого твёрдого тела, использующие дискретизацию. Ещё Пуассон в начале 19 века предлагал рассматривать сплошную среду как систему конечных объёмов. Во второй половине 19 века Д. Максвеллом, А. Кастильяно и другими их современниками были заложены основы анализа стержневых конструкций. В последующие годы были сформулированы метод сил и затем метод перемещений.

Основное отличие МКЭ от классических алгоритмов вариационных принципов и методов невязок заключается в выборе базисных функций. Они берутся в виде кусочно-непрерывных функций, которые обращаются в нуль всюду, кроме ограниченных подобластей, являющихся конечными элементами. Это ведёт к ленточной разреженной структуре матрицы коэффициентов разрешающей системы уравнений.

Основные этапы создания дискретной модели неизвестной величины следующие:

- 1) в исследуемой области задается конечное число точек (узлов);
- 2) значения непрерывной величины в каждом узле считаются неизвестными, они должны быть определены;
- 3) исследуемая область разбивается на конечное число подобластей (элементов), имеющих общие точки (узлы);
- 4) непрерывная величина в каждом элементе аппроксимируется полиномом, который определяется с помощью узловых значений этой величины: для каждого элемента определяется свой полином, но его коэффициенты подбираются так, чтобы сохранялась непрерывность величины на каждой границе элемента.

3.2 Расчет пластины МКЭ в Solidworks

Для расчета методом конечных элементов пластины с одинаковыми механическими свойствами в Solidworks требуется:

- 1) построить 3D-модель пластины в программном комплексе Solidworks;
- 2) построить сетку конечных элементов;

Перв. примен.	<p>3) задать граничные условия, приложить нагрузки; 4) определить напряжение пластины; 5) определить перемещение и прогиб пластины.</p> <p>Для расчета методом конечных элементов пластины с разными механическими свойствами в Solidworks требуется:</p> <p>1) для построения 3D-модели пластины потребовалось построить 3 детали в программном комплексе Solidworks из которых состоит пластина, склеить их между собой и присвоить каждой детали разные механические свойства, путем присвоения разных материалов; 2) построить сетку конечных элементов; 3) задать граничные условия, приложить нагрузки; 4) определить напряжение пластины; 5) определить перемещение и прогиб пластины.</p>				
Справ. №	<p>Для расчета методом конечных элементов пластины с разными механическими свойствами и трещиной в Solidworks требуется:</p> <p>1) для построения 3D-модели пластины потребовалось построить 3 детали в программном комплексе Solidworks из которых состоит пластина, склеить их между собой и присвоить каждой детали разные механические свойства, путем присвоения разных материалов; 2) построить сетку конечных элементов; 3) для моделирования трещины нам потребовалось закрепить часть нижней грани симметричными граничными условиями, кроме той части где находилась трещина, приложить нагрузки; 4) определить напряжение пластины; 5) определить перемещение и прогиб пластины.</p>				
Подпись и дата					
Инв. № дубл.					
Взам. инв. №					
Подпись и дата					
Инв. № подл.					
					БР – 15.02.02 ПЗ
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	

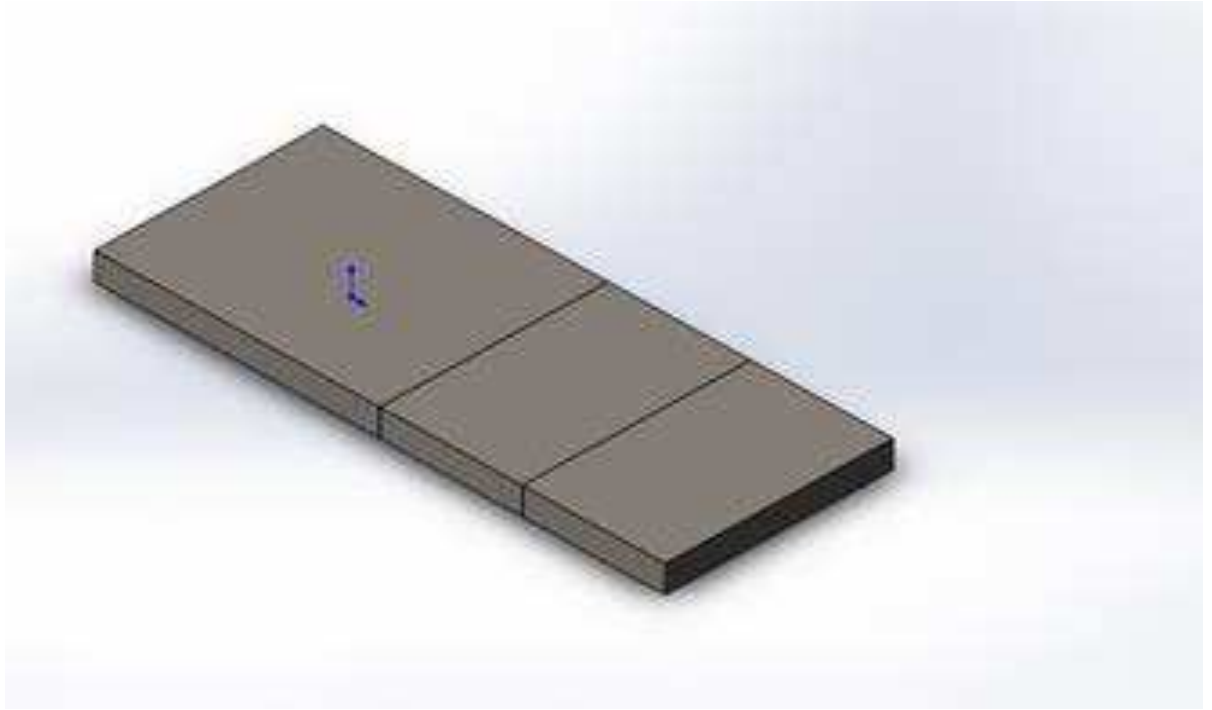


Рисунок 25 - Трехмерная модель пластины

3.3 Генерация конечно-элементной сетки

Для получения численного решения необходимо выполнить разбиение геометрических моделей конечно – элементной сеткой.

Сетка генерируется на геометрической модели и является основой для составления и решения системы уравнения в матричном виде. Существует два способа генерации сетки:

- автоматическая генерация сетки с установками по умолчанию при запуске на решение. При этом имеется возможность предварительно просмотреть сетку до запуска на расчет, чтобы оценить её соответствие поставленной задаче;

- генерация сетки с задаваемыми пользователем установками. В этом случае пользователь самостоятельно определяет особенности создаваемой сетки и задает значения необходимых параметров.

Генерируем сетку конечных элементов на модели пластины. Статистика сетки: 11955 узлов, 6974 элемента.

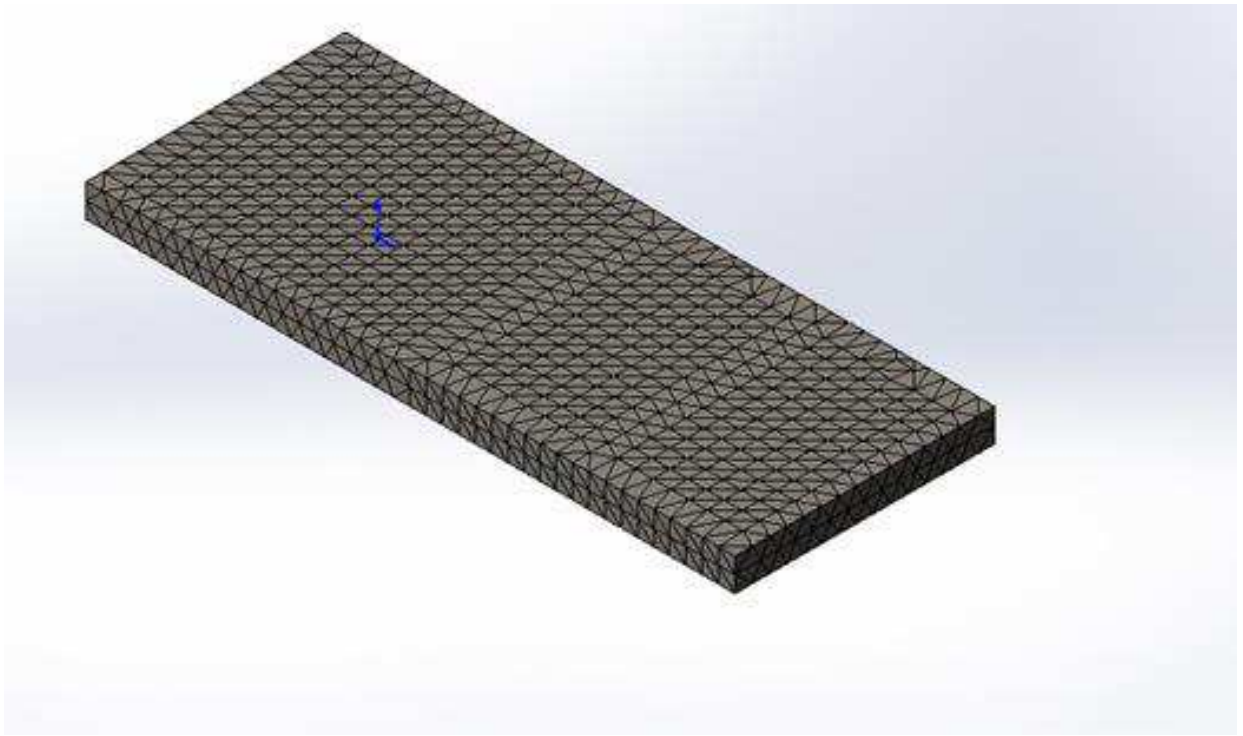


Рисунок 26 - Сетка конечных элементов на трехмерной модели пластины

3.4 Нагрузки и граничные условия

Одним из важнейших этапов подготовки к проведению расчетов и получению достоверных результатов является определение внешних воздействий на конструкцию. Обычно внешнее воздействие определяется на границе созданной модели. Под граничными условиями в SOLIDWORKS понимается: закрепление, то есть ограничение перемещений и вращений в структурном исследовании, а под нагрузкой – приложение сосредоточенных или распределенных сил.

Граничные условия задаем симметричными. В твердотельных моделях каждую грань, которая совпадает с плоскостью симметрии, следует предотвратить от движения в направлении по нормали. Тип симметричное ограничение автоматически применяет настоящее условие ко всем выбранным граням. Плоскости симметрии должны быть перпендикулярны друг другу.

Симметрия требует, чтобы форма, ограничения, нагрузки и свойства материала были симметричны.

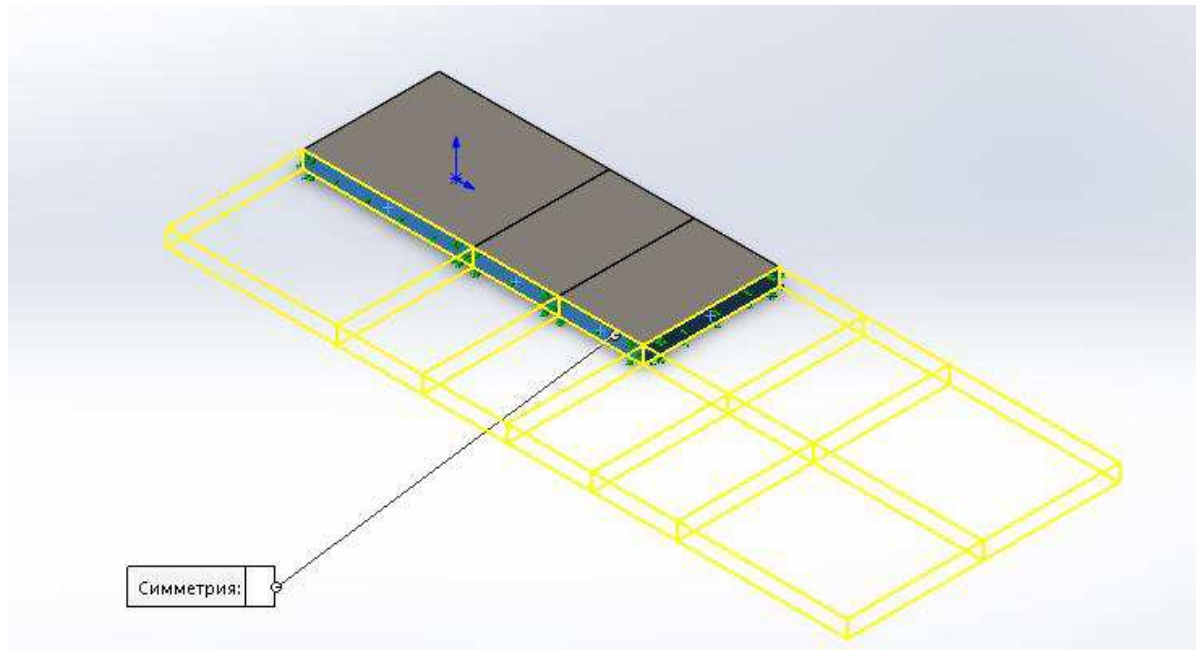


Рисунок 27 . Граничные условия модели пластины

3.5 Граничные условия для пластины с трещиной

Для моделирования трещины нам потребовалось закрепить всю нижнюю грань симметричными граничными условиями, кроме той грани где находится трещина. Закрепляя пластину таким образом мы моделируем трещину.

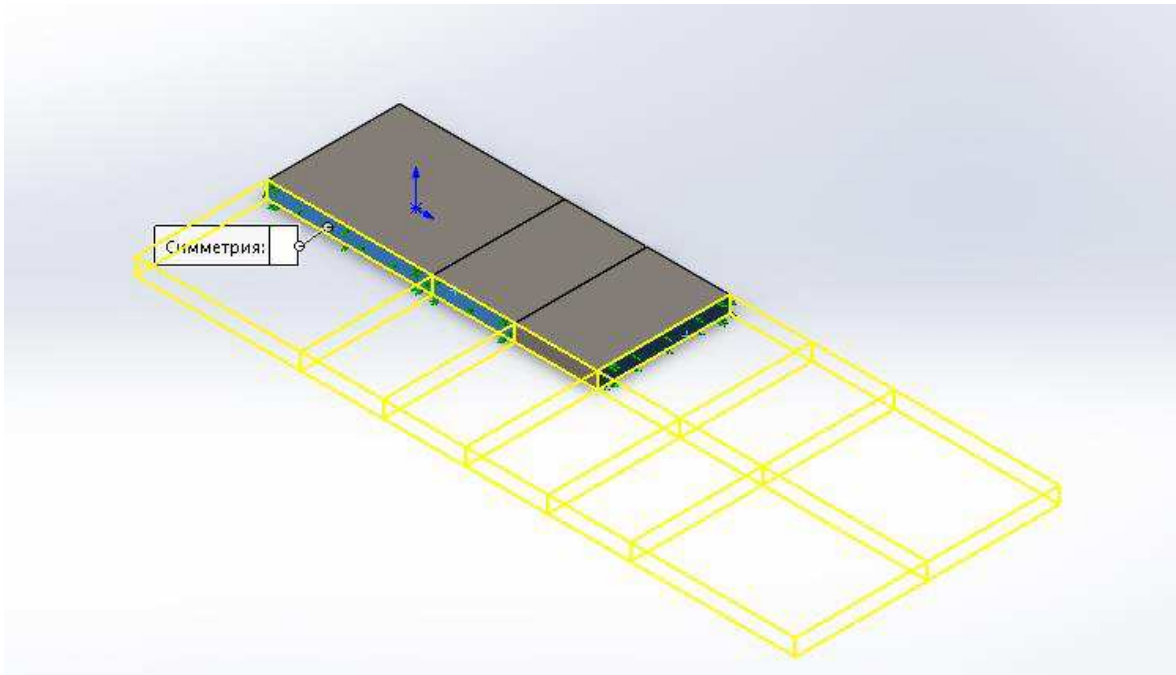


Рисунок 28 - Граничные условия для пластины с трещиной

3.6 Задание нагрузок

Нагрузки в SOLIDWORKS создаются в разделе Simulation. Приложим силу 250Н(реверсивное направление) с противоположной стороне закрепления.

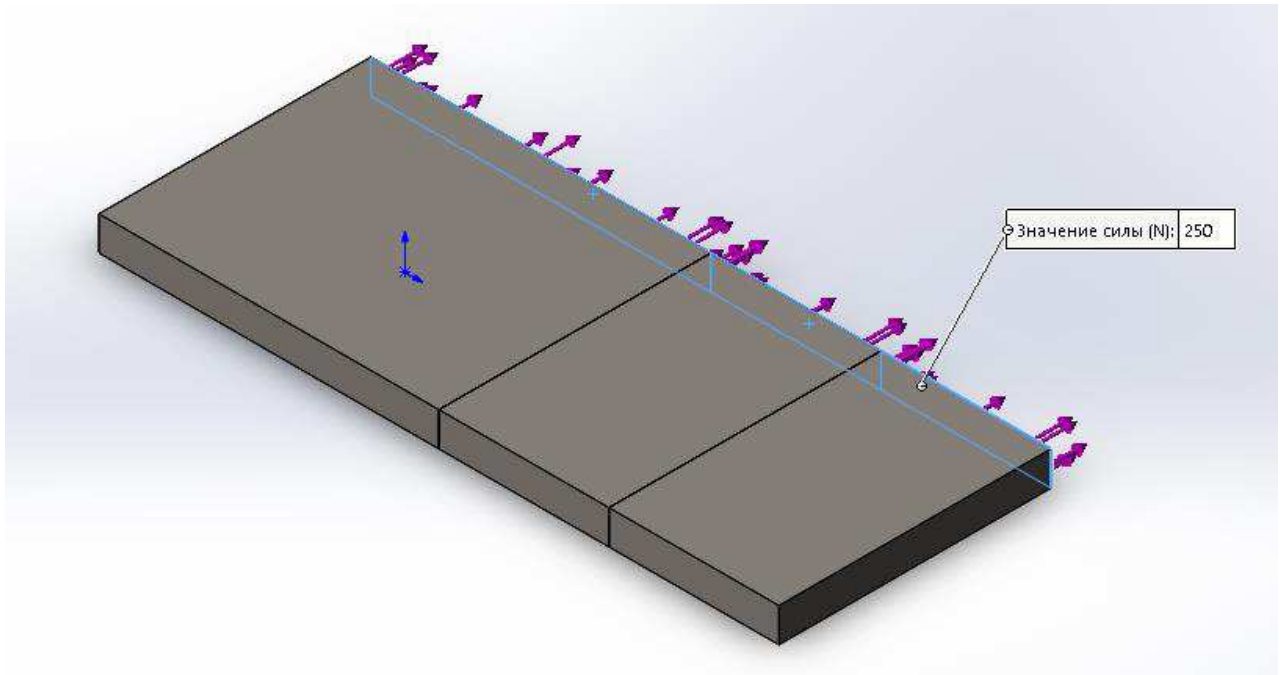


Рисунок 29 - Пластина с приложенными нагрузками

3.7 Создание неоднородных механических свойств

Для присвоения неоднородных механических свойств нам потребовалось: смоделировать 3 материала с различными пределами текучести и пределами прочности, разбить пластину на 3 отдельных детали и присвоить каждой детали свой материал, 3 отдельных детали объединить в одну сборку для проведения исследований.

3.8 Определение напряжений

Для определения напряжений с учетом граничных условий и приложенной к пластине силой 250Н нам потребуется запустить статическое исследование. Данное исследование позволяет определить какие напряжения возникают на поверхности пластины.

Для первой пластины предельно допускаемое напряжение $[\sigma] = 330 \text{ Мпа}$. Максимально возникающее напряжение составило $\sigma = 523818 \text{ Па}$.

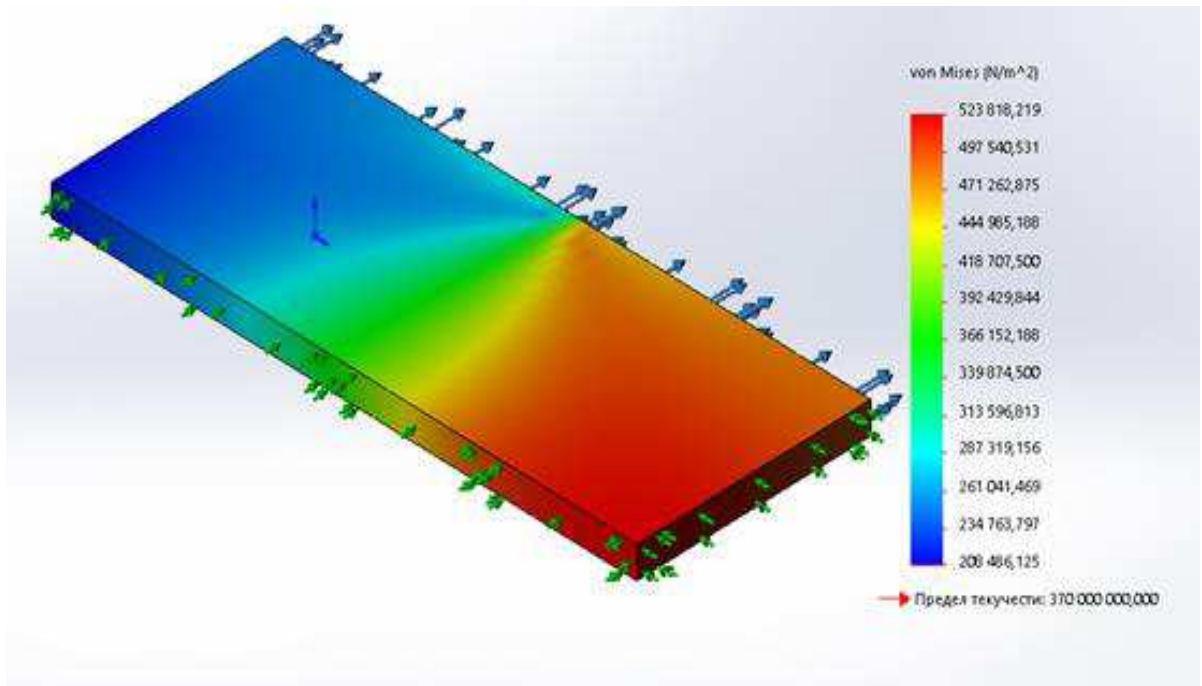


Рисунок 30 - Напряжения пластины с однородными механическими свойствами

Для второй пластины предельно допустимое напряжение $[\sigma] = 282$ Мпа.
Максимально возникающее напряжение составило $\sigma = 208413$ Па.

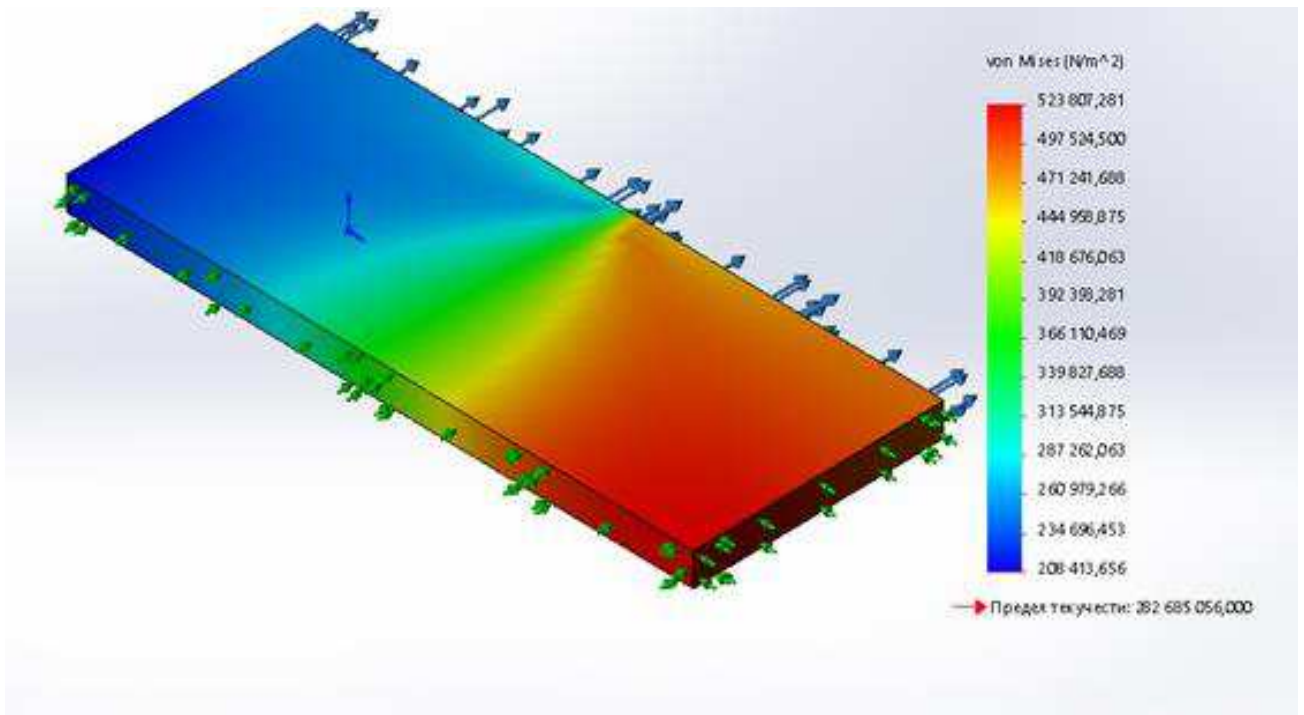


Рисунок 31 - Напряжение пластины с неоднородными механическими свойствами

Для третьей пластины предельно допустимое напряжение $[\sigma] = 282$ Мпа.
Максимально возникающее напряжение составило $\sigma = 2908184$ Па.

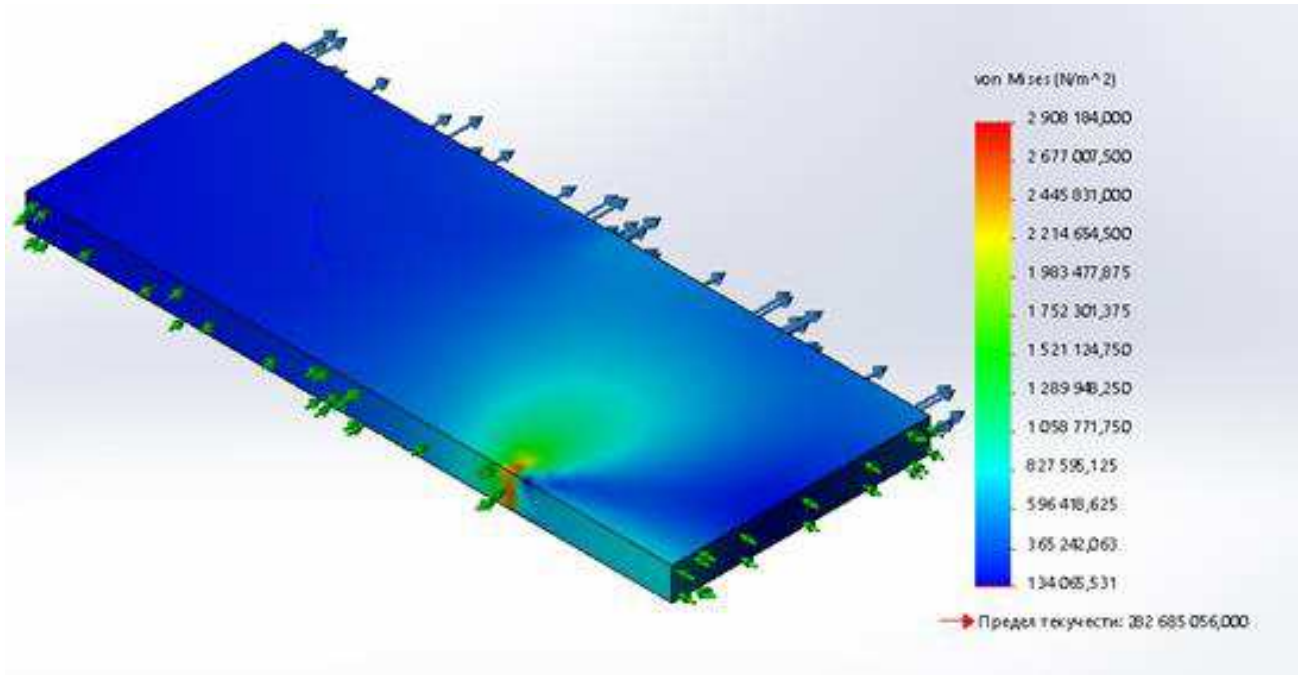


Рисунок 32 - Напряжение пластины с неоднородными механическими свойствами и трещиной

3.9 Определение перемещений

Для определения перемещений с учетом граничных условий и приложенной к пластине силой 250Н нам потребуется запустить статическое исследование. Данное исследование позволяет определить какие перемещения испытывает пластина.

У пластины с однородными механическими свойствами перемещение составило 0,1755мм.

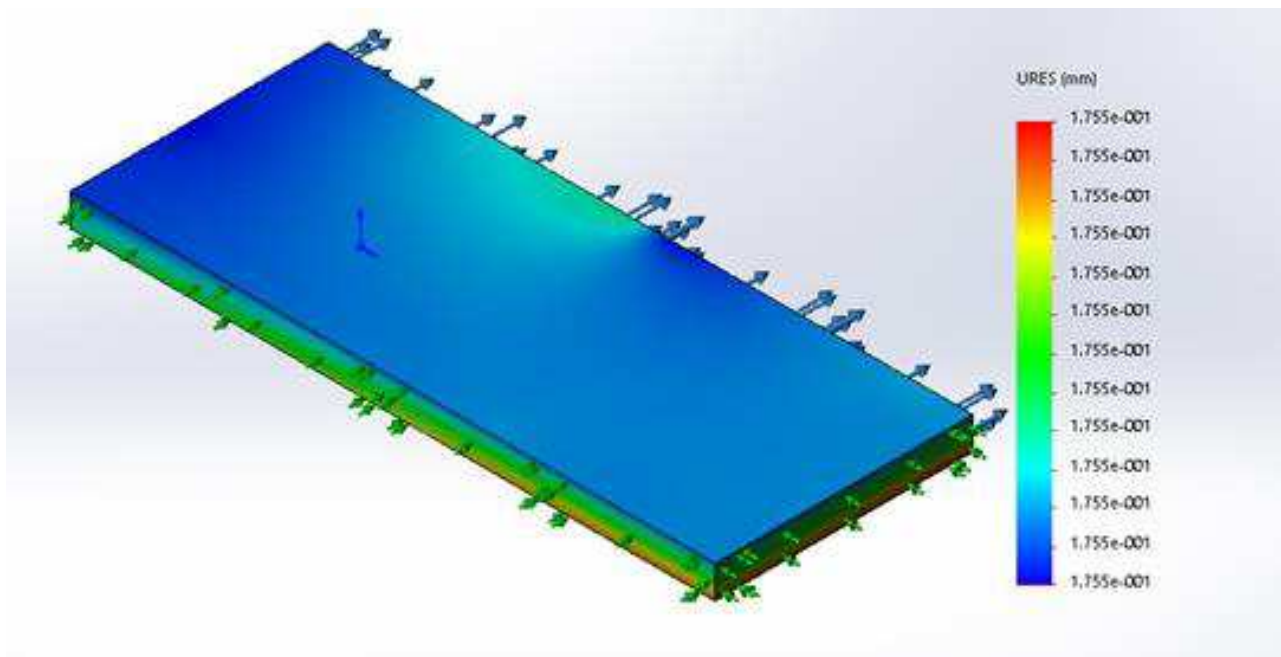


Рисунок 33 - Перемещения пластины с однородными механическими свойствами

У пластины с неоднородными механическими свойствами перемещение составило 0,1281мм.

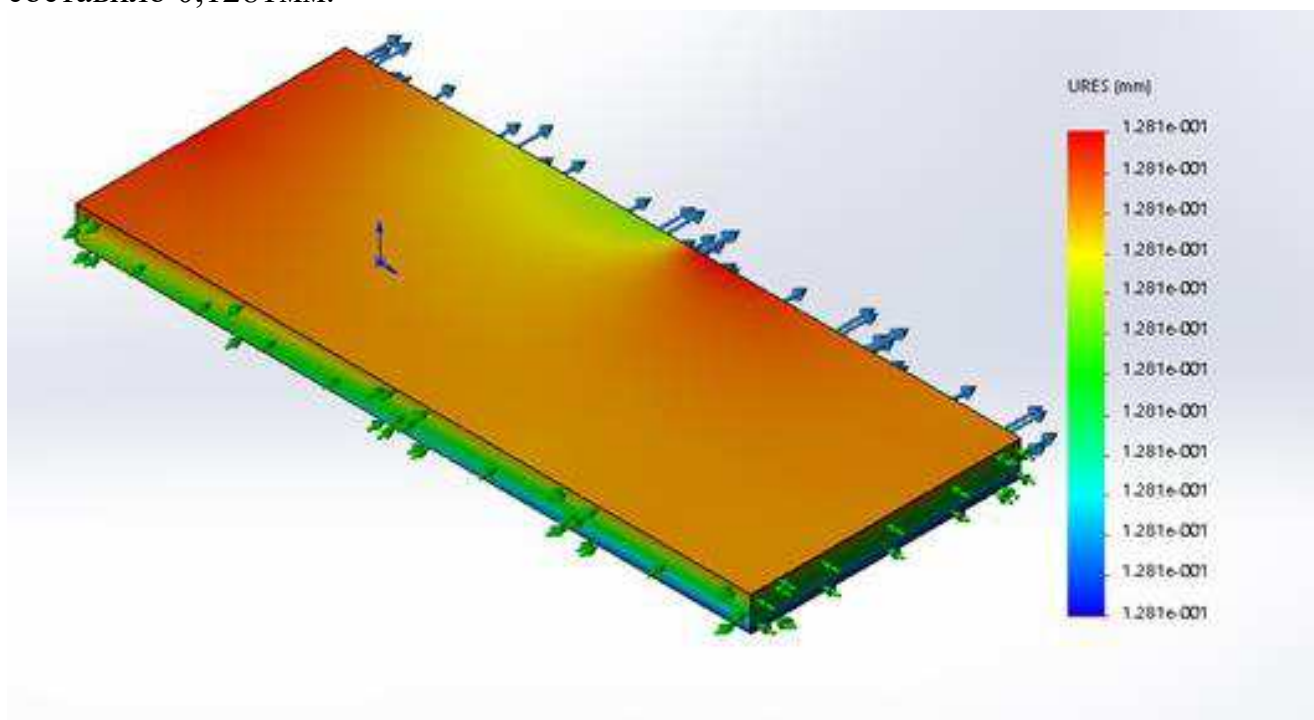


Рисунок 34 - Перемещения пластины с неоднородными механическими свойствами

У пластины с неоднородными механическими свойствами и трещиной перемещение составило 0,2635мм. Что является наибольшим среди рассматриваемых образцов.

Перв. примен.

Справ. №

Подпись и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

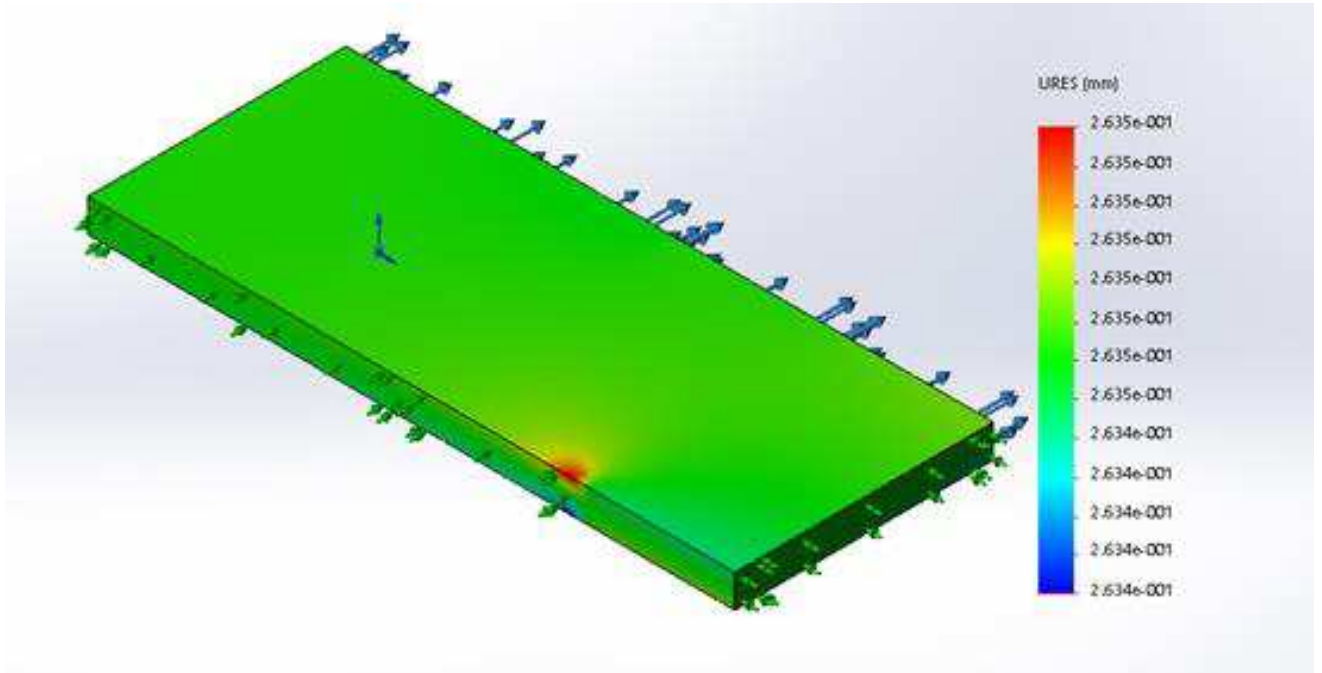


Рисунок 35 - Перемещения пластины с неоднородными механическими свойствами и трещиной

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были построены 3 трехмерные модели пластины: с однородными механическими свойствами, с неоднородными механическими свойствами, с неоднородными механическими свойствами и трещиной.

Произведен расчет напряжений и перемещений пластины методом конечных элементов.

При нагружении пластины с однородными механическими свойствами нагрузкой 250Н, напряжения на поверхности пластины не превышали допускаемых напряжений.

При нагружении пластины с неоднородными механическими свойствами нагрузкой 250Н, напряжения на поверхности пластины не превышали допускаемых напряжений.

При нагружении пластины с неоднородными механическими свойствами нагрузкой 250Н, напряжения на поверхности пластины не превышали допускаемых напряжений.

Были определены перемещения для пластины: с однородными механическими свойствами – 0,1755мм; с неоднородными механическими свойствами – 0,1281мм; с неоднородными механическими свойствами и трещиной – 0,2635мм.

Максимальные напряжения на пластине с неоднородными механическими свойствами на 10% меньше, чем на пластине с однородными. Максимальные напряжения на пластине с неоднородными механическими свойствами и трещиной на 400% больше, чем у двух других рассматриваемых пластин. Пластина с трещиной испытывала меньшие напряжения по всей поверхности пластины, кроме места расположения трещины. Перемещение пластины с однородными механическими свойствами на 73% больше, чем у пластины с неоднородными механическими свойствами.

Перв. примен.

Справ. №

Подпись и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

БР – 15.03.03 ПЗ

Лист
47

Список используемых источников

- 1 Батаев А.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение: Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 384 с.
- 2 Болотин В.В; Новичков Ю.Н. Механика многослойных конструкций. – М.: Машиностроение, 1980. – 375с.
- 3 Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения. – М., ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 328с.
- 4 Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твердости. – М.: Машиностроение, 1979. – 191с.
- 5 Ашкенази Е.К., Ганов Э.В. Анизотропия конструкционных материалов. Л. : Машиностроение, 1980. 247 с.
- 6 С.В. Смирнов, Н.Б. Пугачева, М.В. Мясникова, Е.О. Смирнова. Структурная неоднородность сварного соединения алюминиевого сплава и моделирование его упругой деформации – М.: Физическая механика 17 – 2014

Перв. примен.	Справ. №	Подпись и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата	Инв. № подл.				Лист
							Изм.	Лист	№ докум.	

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ПРИКЛАДНАЯ МЕХАНИКА

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой



А.Е.Митяев

подпись

« 8 » 07 20 19 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

15.03.03 Прикладная механика

Исследование структурной неоднородности характеристик
механических свойств.

Руководитель



подпись, дата

08.07.2019

доцент, к.т.н.

должность, ученая степень

Е.В. Анискович

Выпускник



подпись, дата

08.07.2019

А.А. Амирханов

Красноярск 2019