

**Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Институт машиностроения, материалов и транспорта**

На правах рукописи

Борисов Анатолий Сергеевич

**Анализ параметров высокоскоростного кручения алюминия и его
сплавов при повышенных температурах**

Направление подготовки 22.06.01 Технологии материалов

Код и наименование

Направленность 22.06.01_04 Обработка металлов давлением

Код и наименование

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: Борисов А.С.
Научный руководитель: д.т.н., проф. Цеменко В.Н.

Санкт Петербург – 2020

Научно-квалификационная работа выполнена в Высшей школе физики и технологии материалов Института машиностроения, материалов и транспорта федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Директор ВШФиТМ: к.х.н., доцент Семенча А.В.

Научный руководитель: д.т.н., профессор Цеменко В.Н.

Рецензент: к.т.н., доцент Наумов А.А.

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Рост спроса на алюминий и алюминиевые сплавы в машиностроении, автомобилестроении, космонавтике, авиации и вагоностроении является движущей силой развития новых способов обработки, применения и прогнозирования структуры и механических свойств. Благодаря непрерывному техническому прогрессу в вопросах совершенствования технологий производства изделий из алюминия и его сплавов, их использование постоянно расширяется. Поэтому дефицит энергоресурсов в мире, глобальное потепление и экономический кризис, еще острее указывают на поиск новых менее затратных способов прогнозирования структуры и свойств алюминия и его сплавов в новых применяемых технологиях.

Одной из таких технологий является сварка трением с перемешиванием (СТП). СТП пользуется большим спросом в таких отраслях, как авиа-, судо-, вагоностроение и многих других, благодаря своим преимуществам, отличающих ее от так называемых «традиционных» способов сварки плавлением. Формирование сварного соединения при СТП происходит в твёрдой фазе за счёт воздействия не расходуемого вращающегося инструмента, перемешивающего материал заготовок в сварном шве.

Основным этапом разработки новых технологий является физическое моделирование. Поскольку оно занимает главное место среди этапов создания новых технологий, ему уделяется огромное внимание. Для разработки технологии СТП различных материалов исследователи часто используют методы физического моделирования для более глубокого понимания процессов структурообразования. Стоит отметить, что процесс СТП является очень сложным с точки зрения определения деформационных параметров, поэтому с помощью физического моделирования до сих пор не удаётся смоделировать весь процесс. Для СТП характерны большие степени и скорости деформации при повышенных температурах, что сложно реализуемо даже на самых современных комплексах для физического моделирования.

Из опыта исследователей, занимавшихся физическим моделированием формирования структуры шва при СТП, следует, что воспроизвести структуру шва после СТП возможно, используя опыты на кручение, но до настоящего времени в полной мере не изучен процесс формирования структуры в ядре сварного шва при сварке трением с перемешиванием. Среди зарубежных и отечественных исследователей нет единого мнения о действующих механизмах структурообразования при этом способе сварки как однородных, так и разнородных материалов. Также не изучены степени и скорости деформации в процессе сварки трением с перемешиванием. Многие исследователи по-разному оценивают эти величины и не могут прийти к единому мнению. Для этого в данной работе используется математическое моделирование опытов на кручение в программе *DeformTM*.

Цель и задачи исследования

Целью данной работы является анализ параметров высокоскоростного кручения алюминия и его сплавов при повышенных температурах для оценки деформационных параметров (степени и скорости деформации, напряжения) происходящих при физическом моделировании СТП.

Для реализации цели необходимо выполнить следующие задачи:

- разработать физическую модель
- разработать математическую модель
- спланировать, подготовить и провести серию экспериментов по физическому моделированию
- определить влияние термо-деформационных параметров при физическом моделировании на структурообразование
- определить степени, скорости деформации и напряжения, возникающие при физическом моделировании с помощью математического моделирования

Научная новизна

Научная новизна работы состоит в том, что с помощью математического и физического моделирования определены деформационные параметры при реальном процессе СТП.

Теоретическая и практическая значимость

Результаты, изложенные в диссертации, вносят вклад в существующие представления о закономерностях структурообразования и деформационных параметрах алюминия и алюминиевых сплавов в процессе сварки трением с перемешиванием. В частности, предложен подход к изучению данных процессов, основанный на математическом и физическом моделировании.

Апробация работы

Результаты работы доложены и обсуждены на российских и международных конференциях: New Materials and Technologies In Mechanical Engineering (СПб, 2019); Materials Science and Technology Conference and Exhibition 2019 (Portland, Oregon, USA, 2019).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Объекты и методы исследования

Объектом исследования были выбраны сплавы на основе алюминия типа АМг5М и Д16АТ, а также технически чистый алюминий А5Н. Для анализа параметров высокоскоростного кручения алюминия и его сплавов при повышенных температурах было проведено математическое и физическое моделирование процесса при $T = 350^{\circ}\text{C}$ и $T = 500^{\circ}\text{C}$ с различными степенями и скоростями деформации.

При помощи математического и физического моделирования было определено влияние параметров высокоскоростного кручения на алюминии и алюминиевых сплавах, были определены термо-деформационные параметры, характерные для кручения. Была проведена качественная оценка структурообразования при высокоскоростном кручении алюминия и алюминиевых сплавов.

Результаты и их обсуждение

Физическое моделирование

Физическое моделирование термомеханического воздействия на металл в процессе СТП осуществлялось при помощи испытаний на кручение на комплексе *Gleeble-3800* и модуле *Torsion*. Стандартный образец на кручение для комплекса *Gleeble-3800* имеет диаметр рабочей части 10 мм. Для достижения больших скоростей охлаждения после горячей деформации диаметр рабочей части образца был уменьшен до 5,7 мм. Чертеж образца для физического моделирования представлен на рисунке 1.

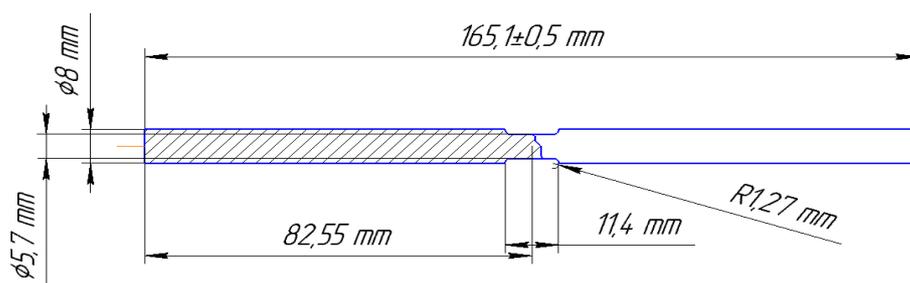


Рис.1. Образец для физического моделирования СТП

Контроль и управление температурой в рабочей части образца осуществляется при помощи термопар К типа. В ходе экспериментов на комплекс *Gleeble* минимум одна термопара должна быть управляющей, это означает, что с нее снимаются показания во время эксперимента и по этим показаниям за счет обратной связи система регулирует силу тока таким образом, чтобы заданная температура совпадала с показаниями управляющей термопары. Обычно управляющая термопара приваривается в центр рабочей зоны, где температура максимальна. В случае опытов на кручение это приведет к намотке термопары при деформации на образец и последующее оплавление изоляции или ее отрыв. Поэтому в таких случаях управляющую термопару располагают ближе к краю рабочей зоны образца, которая не деформируется. Чтобы при таком расположении термопары задавать температуру в центре рабочей зоны образца, необходимо определить температурный градиент в ней. Для определения температурного градиента и для определения максимальной скорости естественного охлаждения образца из сплава АМг5М был проведен эксперимент по нагреву и естественному

охлаждению с двумя термопарами, приваренными в рабочей зоне в центре и с краю (линии 1 и 2 соответственно, рисунок 2). Данные эксперимента могут быть использованы и для других алюминиевых сплавов с близкими значениями теплопроводности.

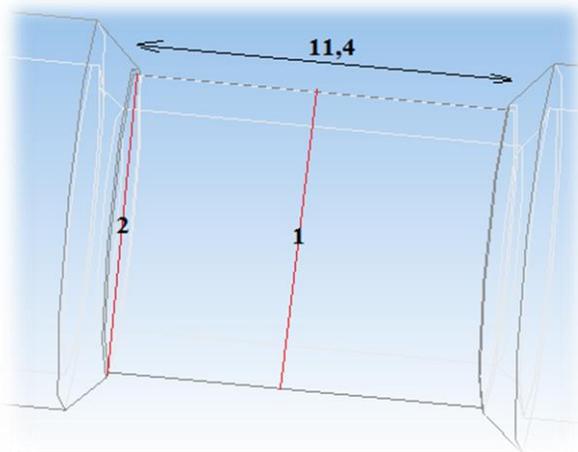


Рис.2. Схема расположения термопар

Полученные зависимости температуры от времени для обеих термопар представлены на рисунке 3. Для сплавов А5Н, АМг5М и Д16АТ планируется проведение экспериментов на кручение при температурах 500 и 365 °С. При нагреве до 500 °С центральной части рабочей зоны температура на периферии рабочей зоны соответствует 475 °С. Температуре 365 °С центральной части рабочей зоны соответствует температура 350 °С на периферии рабочей зоны.

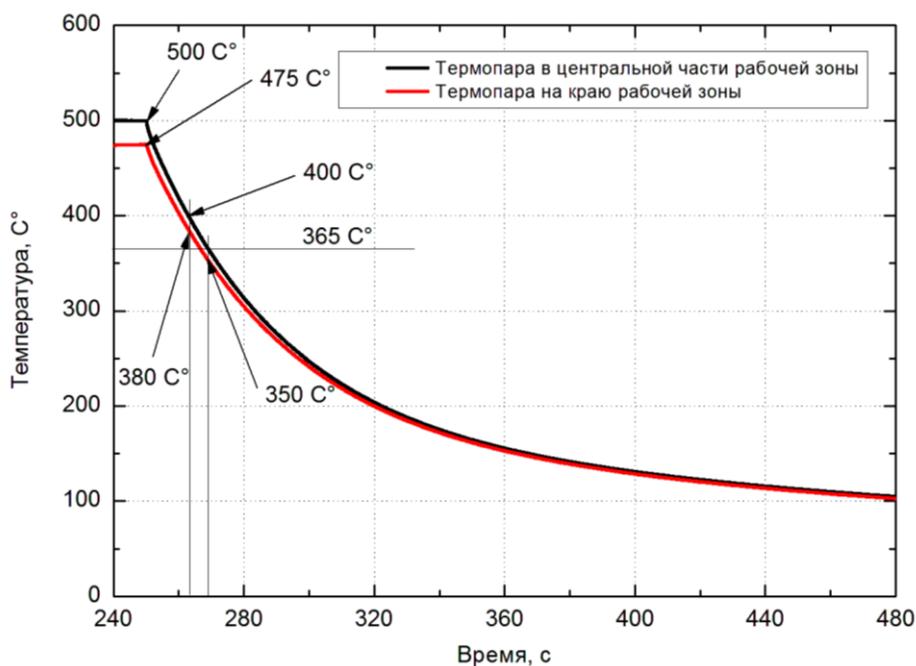


Рис.3. Зависимость температуры от времени для двух зон

Физическое моделирование процесса СТП проводилось на трех алюминиевых сплавах А5Н, АМг5М и Д16АТ. Схема проведения эксперимента показана на рисунке 4.

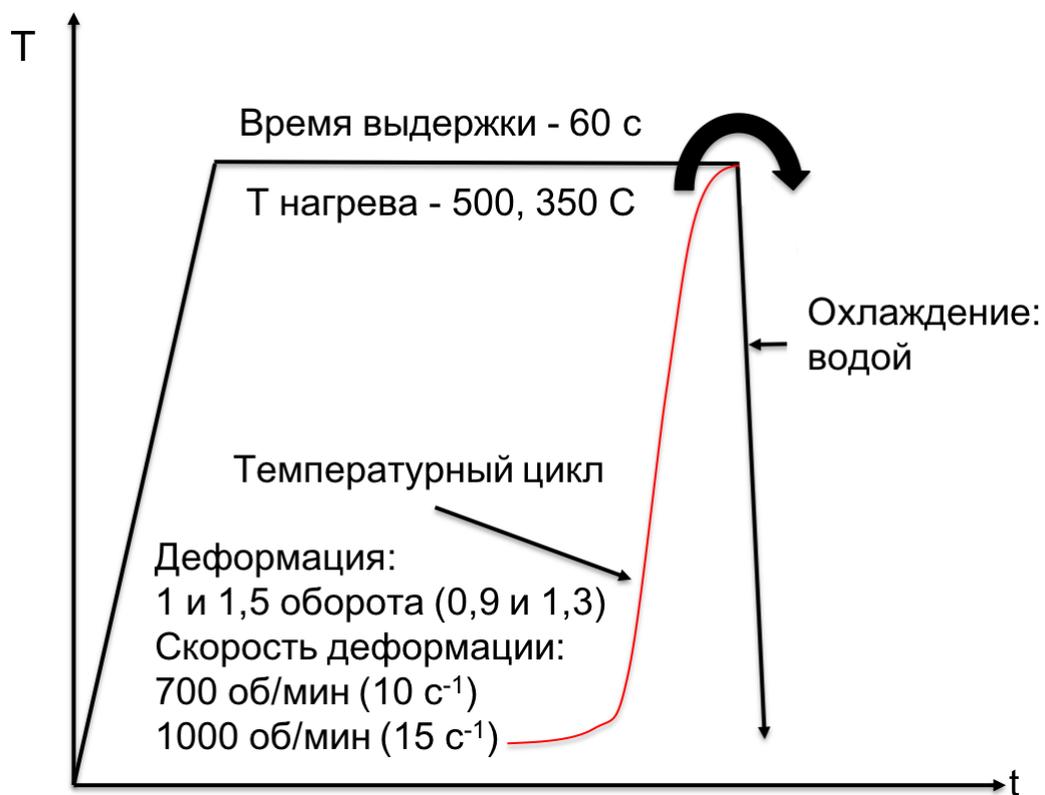


Рис.4. Схема проведения эксперимента

В ходе экспериментов фиксировались момент и вращение траверсы. Используя эти данные были рассчитаны эквивалентные напряжение и деформация в каждый момент времени по следующим формулам

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{r \cdot \theta}{l} \quad (1)$$

где θ - количество оборотов в радианах, r и l – радиус и длина рабочей зоны в мм;

$$\bar{\sigma} = \sqrt{3} \cdot \frac{M}{2 \cdot \pi \cdot r^3} \cdot (3 + n + m) \quad (2)$$

где M - момент в Нм, n – коэффициент деформационного упрочнения, m – коэффициент скорости деформации, $n=m=0$.

Результаты физического моделирования

На рисунке 5 представлены зависимости эквивалентного напряжения от эквивалентной деформации при кручении образцов из сплава А5Н при $T = 350$ и 500 °С и скоростях деформации 10 и 15 с⁻¹.

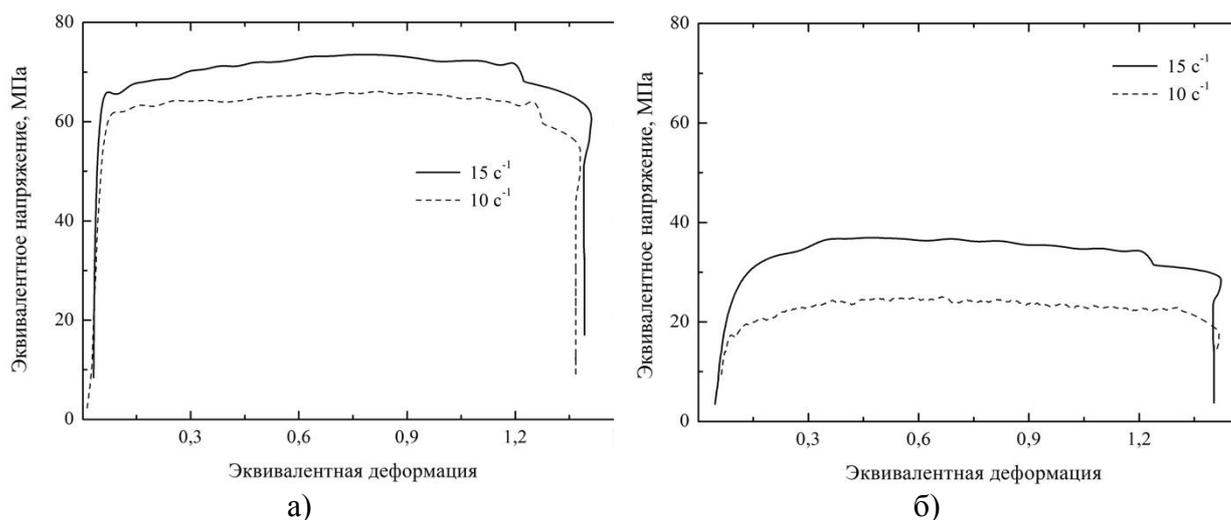


Рис.5. Зависимости эквивалентного напряжения от эквивалентной деформации при кручении образцов из сплава А5Н при а) - $T = 350$ 0С, б) - $T = 500$ 0С

На рисунке 6 представлены зависимости эквивалентного напряжения от эквивалентной деформации при кручении образцов из сплава АМг5М при $T = 350$ и 500 °С и скоростях деформации 10 и 15 с⁻¹.

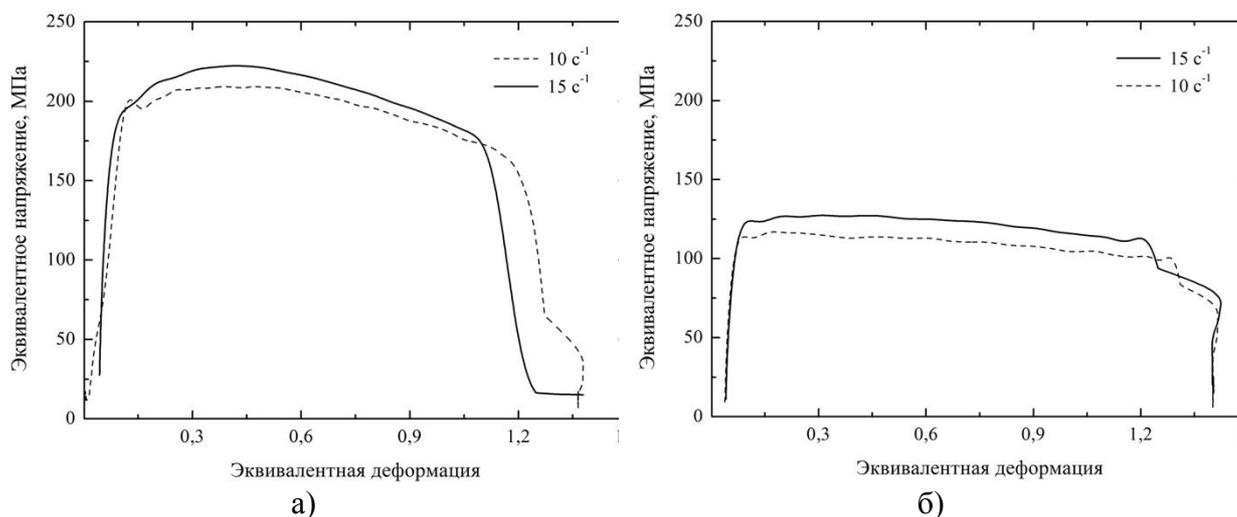


Рис.6. Зависимости эквивалентного напряжения от эквивалентной деформации при кручении образцов из сплава АМг5М при а) - $T = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$, б) - $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$

На рисунке 7 представлены зависимости эквивалентного напряжения от эквивалентной деформации при кручении образцов из сплава Д16АТ при $T = 350$ и $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ и скоростях деформации 10 и 15 c^{-1} .

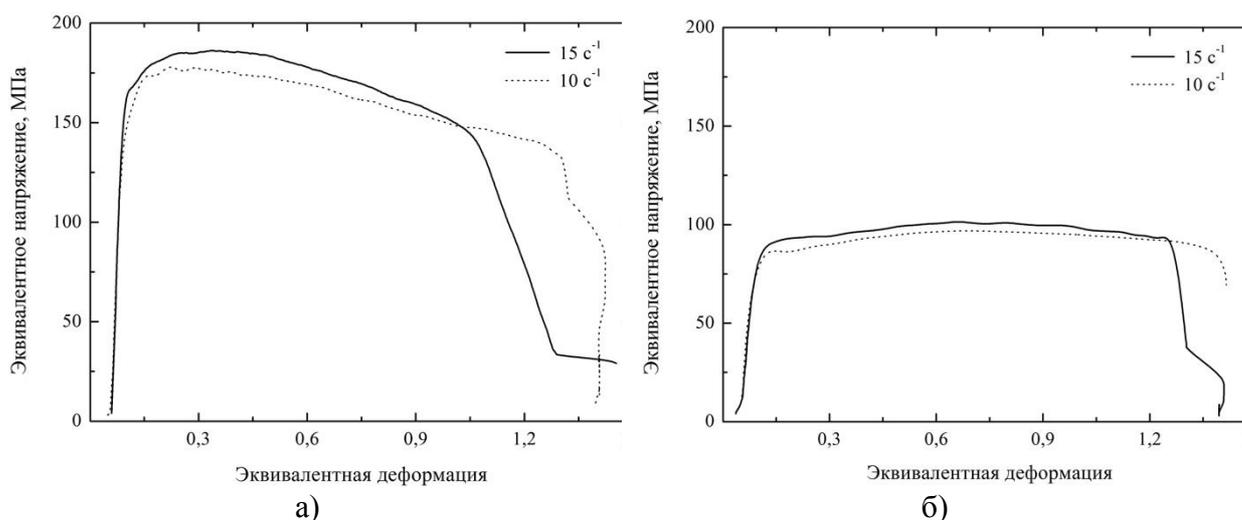


Рис.7. Зависимости эквивалентного напряжения от эквивалентной деформации при кручении образцов из сплава Д16АТ при а) - $T = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$, б) - $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$

Как видим из рисунков 5-7 при температуре испытаний $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ прочностные характеристики сплавов АМг5М и Д16АТ отличаются незначительно в пользу сплава АМг5М. Обращает на себя внимание поведение сплава Д16АТ: на начальном этапе нагружения материал начинает деформироваться до степени $0,3$ при относительно низких величинах внутренних напряжений. Во время испытаний при температуре $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ превосходство сплава АМг5М над Д16АТ в сопротивлении кручению

становится заметнее. Что касается сплава А5Н, то его прочностные характеристики гораздо ниже, чем у Д16АТ и АМг5М.

Для всех сплавов повышение температуры испытаний с 350° до 500° С сопровождается понижением прочностных характеристик. Температура в различной степени влияет на снижение свойств сопротивления сплавов кручению. Для АМг5 увеличение температуры с 350° до 500° С привело к уменьшению максимальных значений внутренних напряжений при кручении на ~43%, для Д16АТ при тех же условиях на ~36%, для А5Н ~55%. Можно сделать вывод, что в данном диапазоне температур сплав Д16АТ теряет свои механические свойства в меньшей степени, чем АМг5 и А5Н.

Математическое моделирование

Математическое моделирование проводилось с использованием программы Deform-3D™.

Модель образца для математического моделирования представлена на рисунке 6.

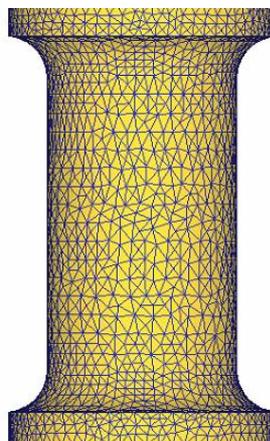


Рис. 6. Образец для математического моделирования сеткой конечных элементов

Данная модель образца обусловлена несколькими факторами:

- равномерное распределение сетки, для сравнения на рис.7. представлена полная модель образца. Видно, что сетка с таким же количеством элементов (32000 элементов) в модели, использованной в данной работе, является основной частью узлов сетки в рабочей части образцов, а в общей модели – основная часть узлов сетки находится в «захватах»;
- более точные расчеты.

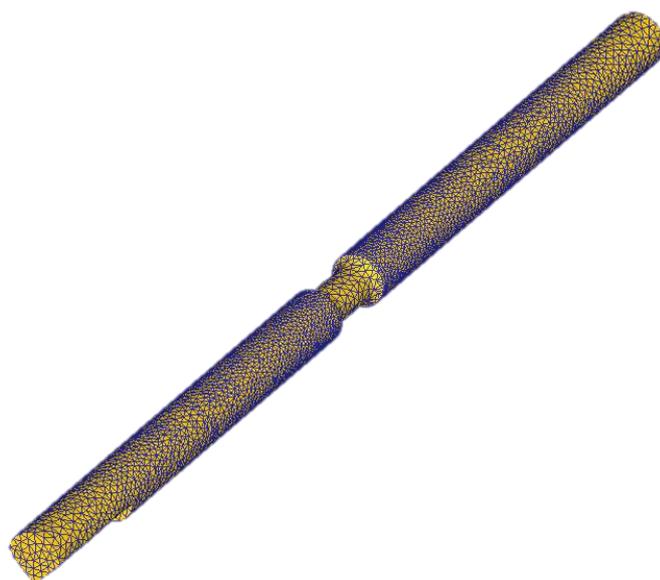


Рис. 7. Полномасштабная модель образца

В программном пакете Deform 3-D материалы А5Н, АМг5М и Д16АТ доступны библиотеки стандартных моделей материалов.

Задача была поставлена для расчета температуры и деформации с постоянным шагом по времени, выбранным 0,0001 с. Модель рабочей зоны образца импортирована как геометрия основной заготовки. К каждому его концу был жестко прикреплен жесткий диск (состояние прилипания), один из которых зафиксирован, а другой вращается. Поведение заготовки пластичное. Сетка состоит из 32 000 равномерно распределенных элементов. Между всеми объектами коэффициент теплопередачи 0,2. Общий вид модели показан на рисунке 8.

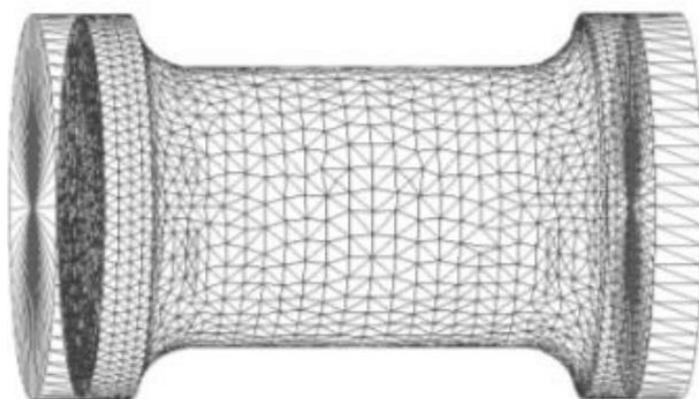


Рис.8. Математическая модель слева направо: неподвижный диск, сетчатая рабочая зона, движущийся диск.

Результаты математического моделирования

На первоначальном этапе была посчитана температурная задача, для оценки коэффициента теплопередачи. Результаты представлены на рисунке 9.

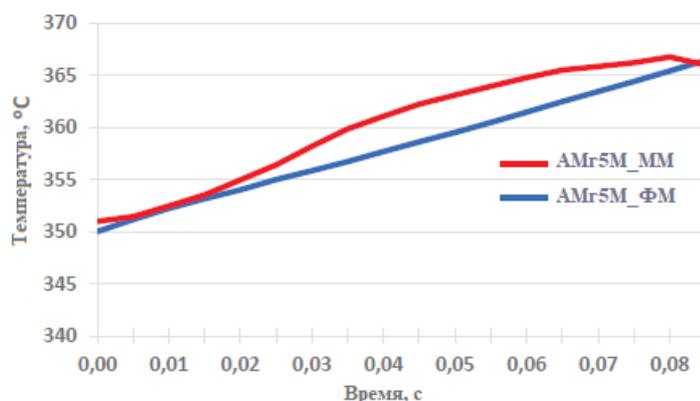


Рис. 9. Сравнение температур сплава АМг5М при математическом (ММ) и физическом (ФМ) моделировании.

Из графика видно, что результаты численного и физического моделирования хорошо согласуются друг с другом. Следует отметить, что максимальное отклонение температуры составляет 4°C , что находится в пределах погрешности измерения термопары. Такое совпадение температур позволяет сделать вывод, что коэффициент теплопередачи для математического моделирования выбран верно.

Далее для всех сплавов были посчитаны деформационные задачи в соответствии с планом эксперимента. План эксперимента представлен в таблице 1.

Таблица 1. План эксперимента

$\varepsilon', \text{c}^{-1}$	10	15
T, °C	(700об/мин)	(1000об/мин)
500	1 и 1,5	1 и 1,5
350	1 и 1,5	1 и 1,5

Результаты расчетов деформационной задачи для сплава А5Н.

На рисунках 10-13 представлены расчеты распределения интенсивности деформаций для сплава А5Н в соответствии с планом эксперимента.

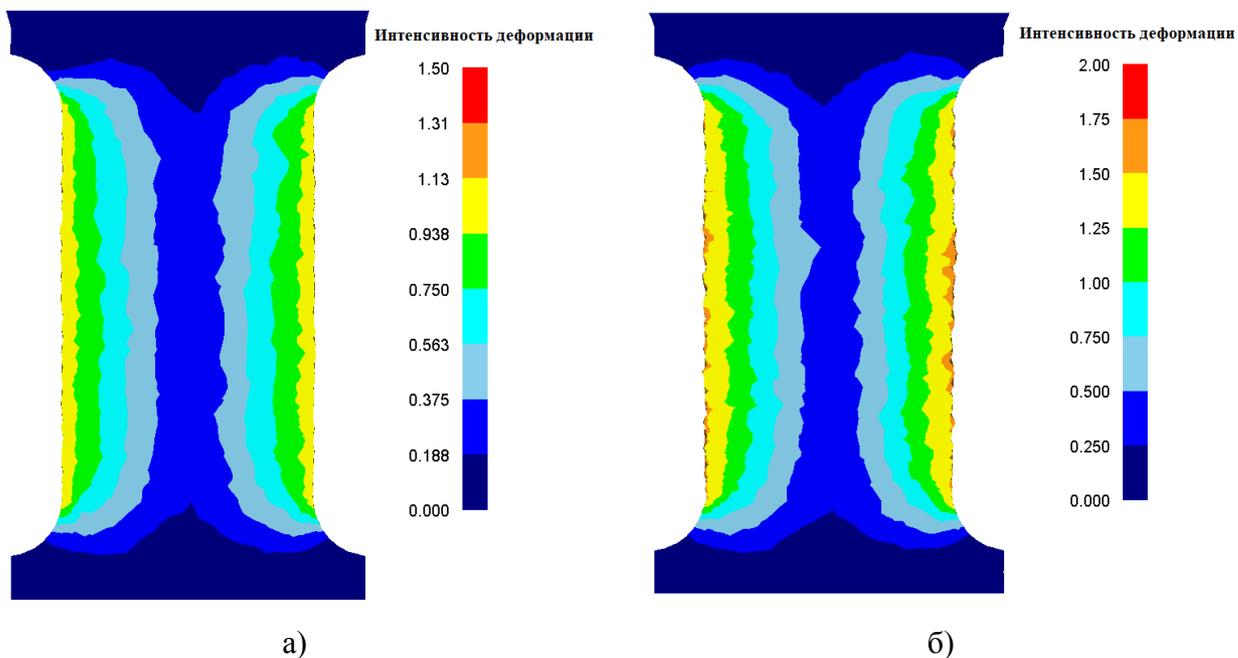


Рис. 10. Распределение интенсивности деформаций для сплава А5Н при температуре 350°C и скорости деформации 700 об/мин: а) - 1 оборот; б) - 1.5 оборота

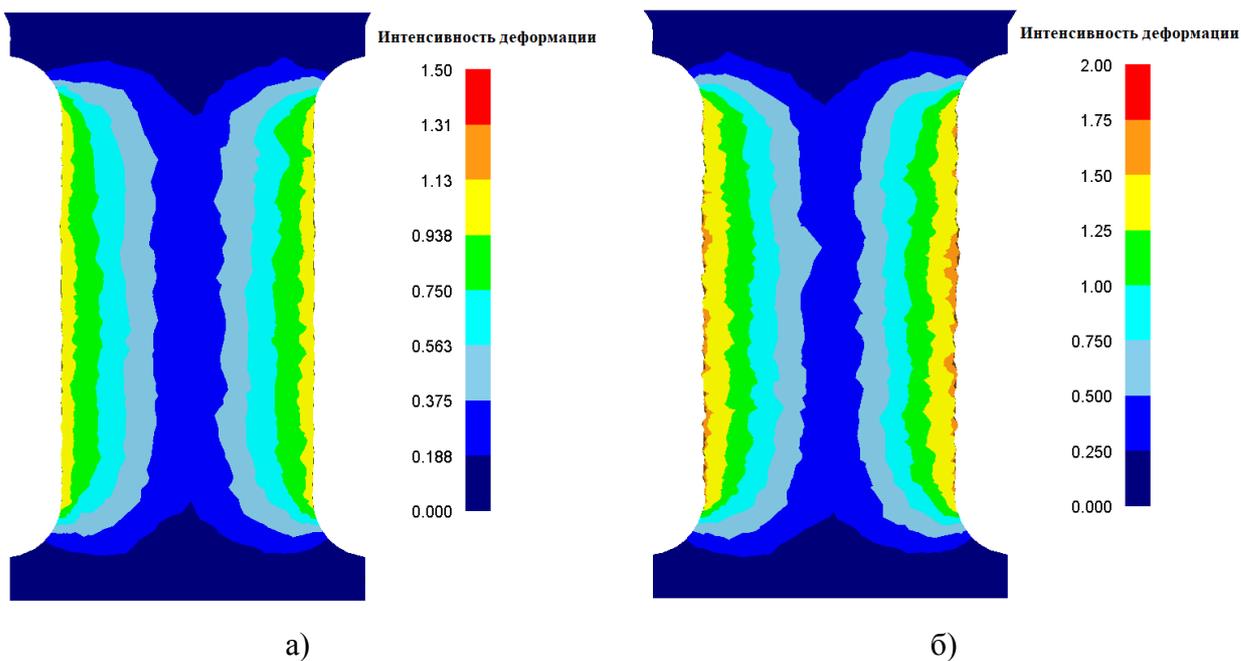


Рис. 11. Распределение интенсивности деформаций для сплава А5Н при температуре 350°C и скорости деформации 1000 об/мин: а) - 1 оборот; б) - 1.5 оборота

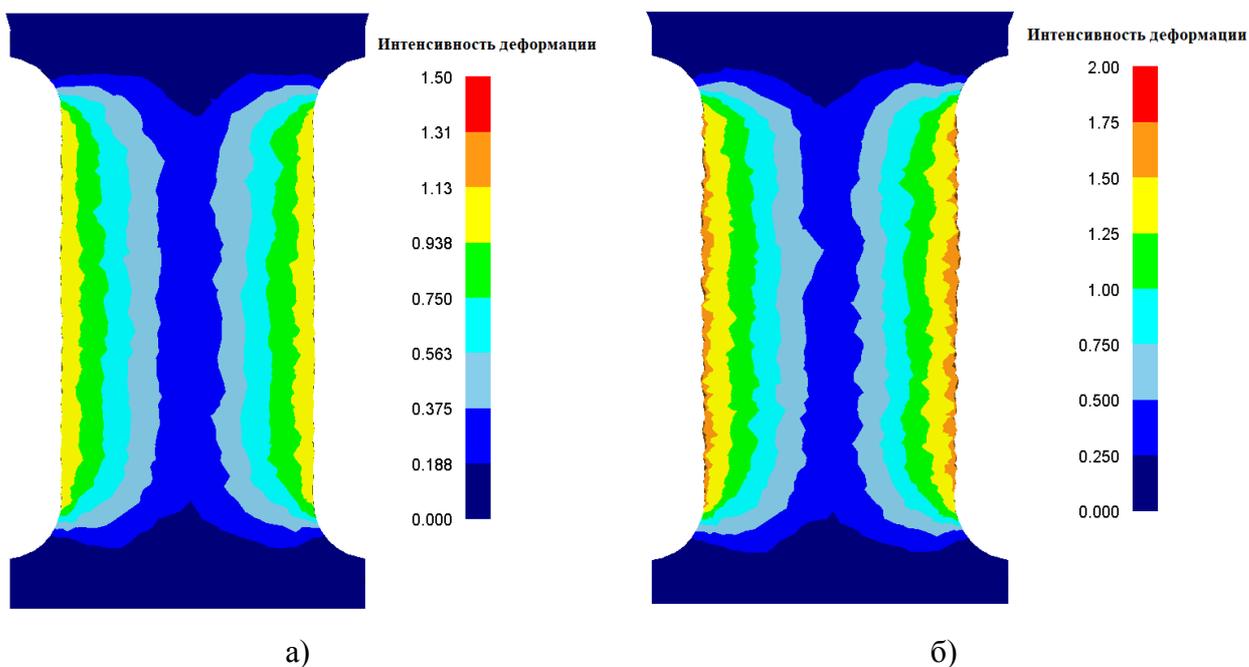


Рис. 12. Распределение интенсивности деформаций для сплава А5Н при температуре 500°С и скорости деформации 700 об/мин: а) - 1 оборот; б) - 1.5 оборота

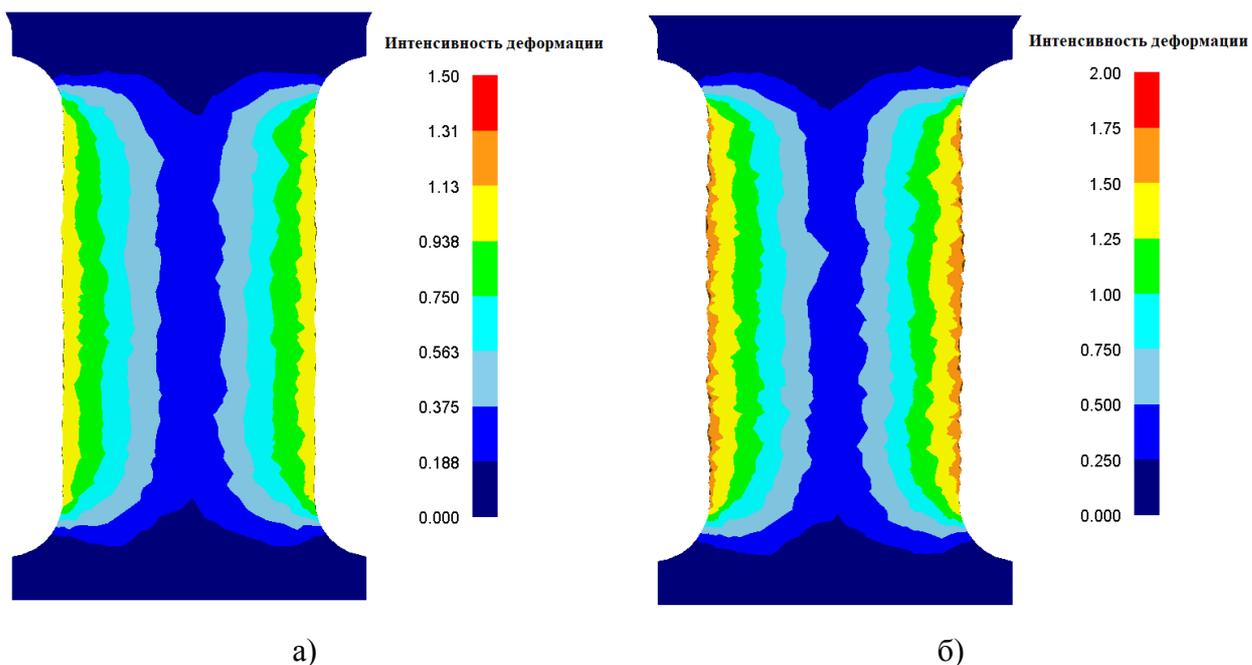


Рис. 13. Распределение интенсивности деформаций для сплава А5Н при температуре 500°С и скорости деформации 1000 об/мин: а) - 1 оборот; б) - 1.5 оборота

Из рисунков 10-13 видно, что характер распределения деформации на всех образцах одинаковый. В приповерхностных слоях интенсивность деформации достигает 0,8-1 для одного оборота и 1,5-1,75 для полутора оборотов, что соответствует расчетным значениям, полученным при

физическом моделировании. Эквивалентную деформацию рассчитывали по формуле (1).

Видно, что наибольшая величина деформации возникает в приповерхностных слоях.

На рисунках 14-17 представлены расчеты распределения интенсивности напряжений для сплава А5Н в соответствии с планом эксперимента.

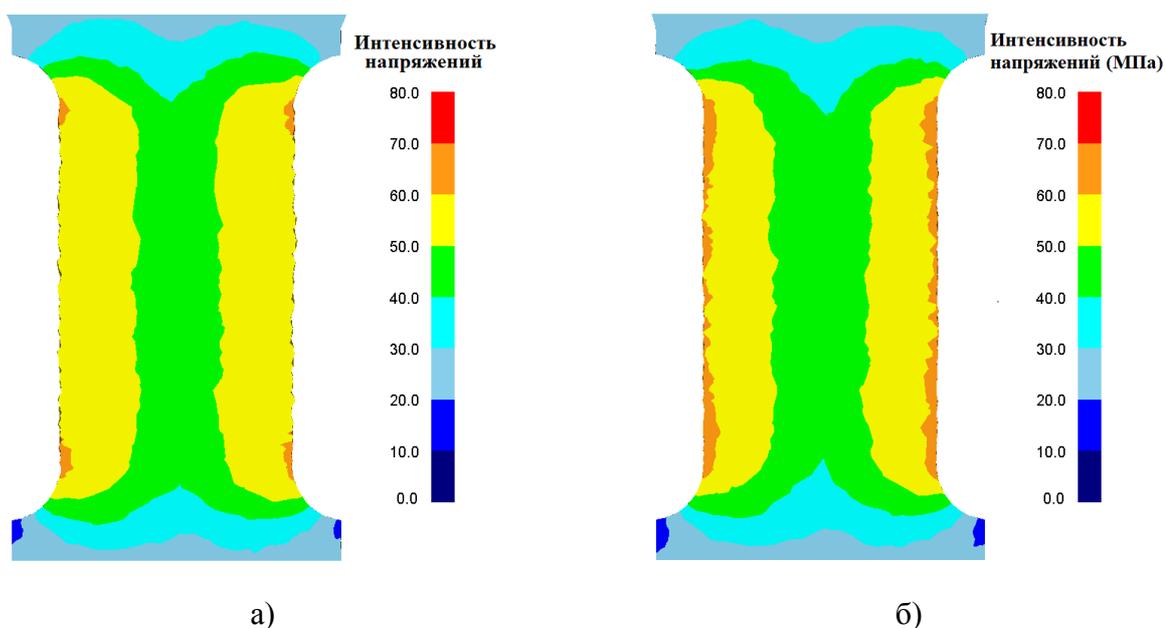


Рис. 14. Распределение интенсивности напряжений для сплава А5Н при температуре 350°C и скорости деформации 700 об/мин: а) - 1 оборот; б) - 1.5 оборота

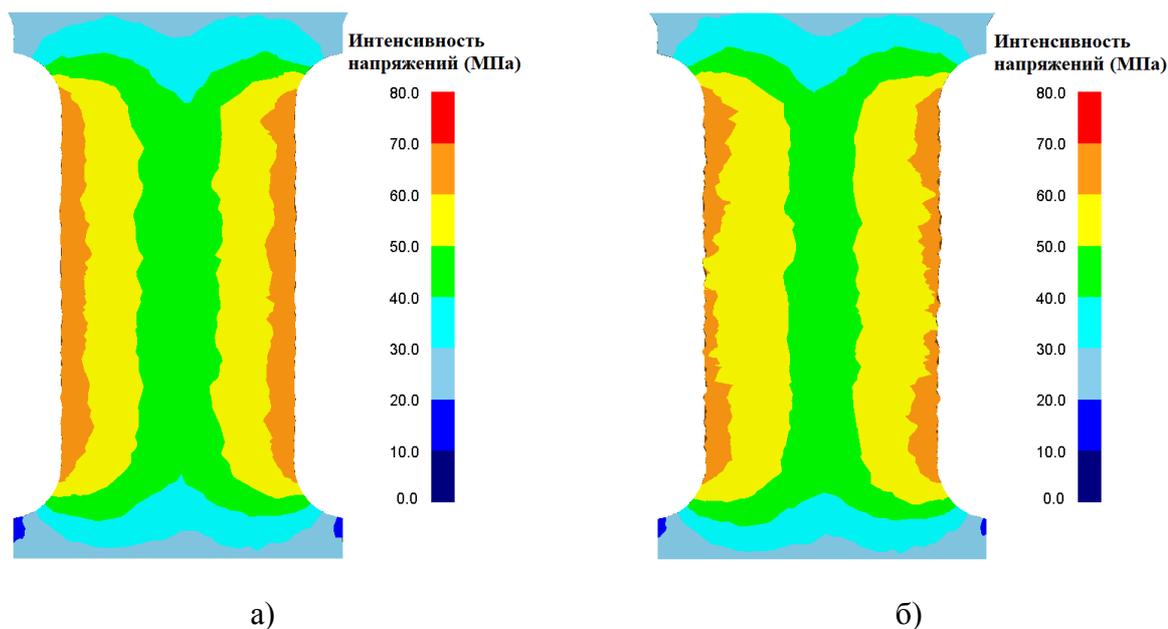


Рис. 15. Распределение интенсивности напряжений для сплава А5Н при температуре 350°C и скорости деформации 1000 об/мин: а) - 1 оборот; б) - 1.5 оборота

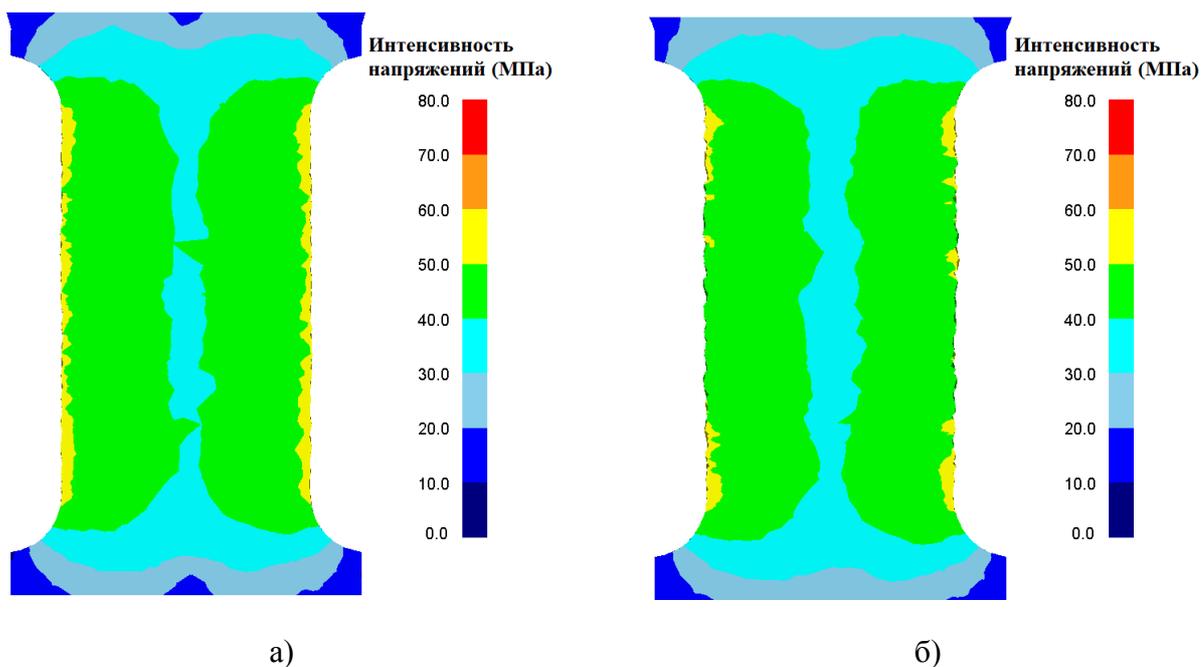


Рис. 16. Распределение интенсивности напряжений для сплава А5Н при температуре 500°С и скорости деформации 700 об/мин: а) - 1 оборот; б) - 1.5 оборота

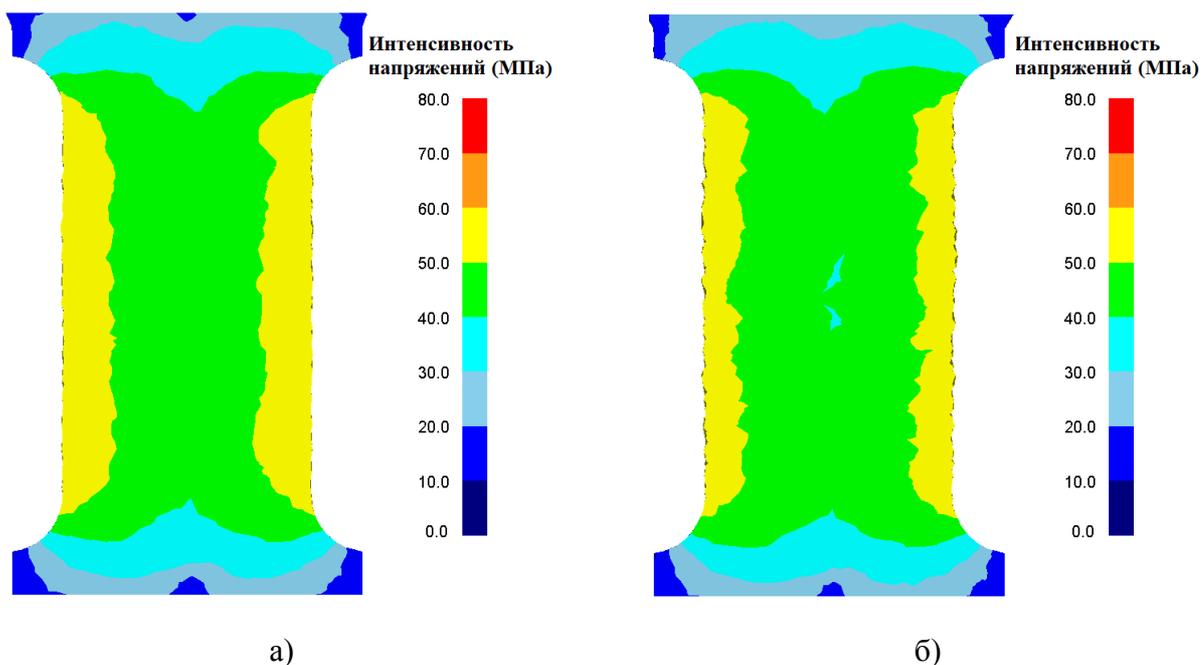


Рис. 17. Распределение интенсивности напряжений для сплава А5Н при температуре 500°С и скорости деформации 1000 об/мин: а) - 1 оборот; б) - 1.5 оборота

Из рисунков 14-17 видно, что характер распределения деформации на всех образцах очень похож. В приповерхностных слоях, как и ожидалось, возникают наибольшие напряжения. Видно, что с повышением температуры возникающие напряжения становятся меньше, так, например, для одного оборота при температуре 350°С и скорости деформации 700 об/мин

напряжения составляют порядка 60 МПа, а для температуры 500°С при тех же условиях деформирования напряжения составляют 50 МПа.

На интенсивность напряжений также влияет скорость кручения, чем больше скорость кручения, тем больше интенсивность напряжений. Количество оборотов не оказывает большого влияния на интенсивность напряжений.

Обобщенные данные по расчетам интенсивности напряжений в приповерхностных слоях представлены в таблице 2.

Таблица 2. Расчетные значения интенсивности напряжений для сплава А5Н

Температура, °С	Количество оборотов	Скорость, об/мин	Интенсивность напряжений, МПа
350	1	700	50-65
		1000	55-70
	1,5	700	50-60
		1000	55-70
500	1	700	40-50
		1000	45-55
	1,5	700	40-50
		1000	45-55

На рисунках 18-21 представлены расчеты распределения скорости деформаций для сплава А5Н в соответствии с планом эксперимента.

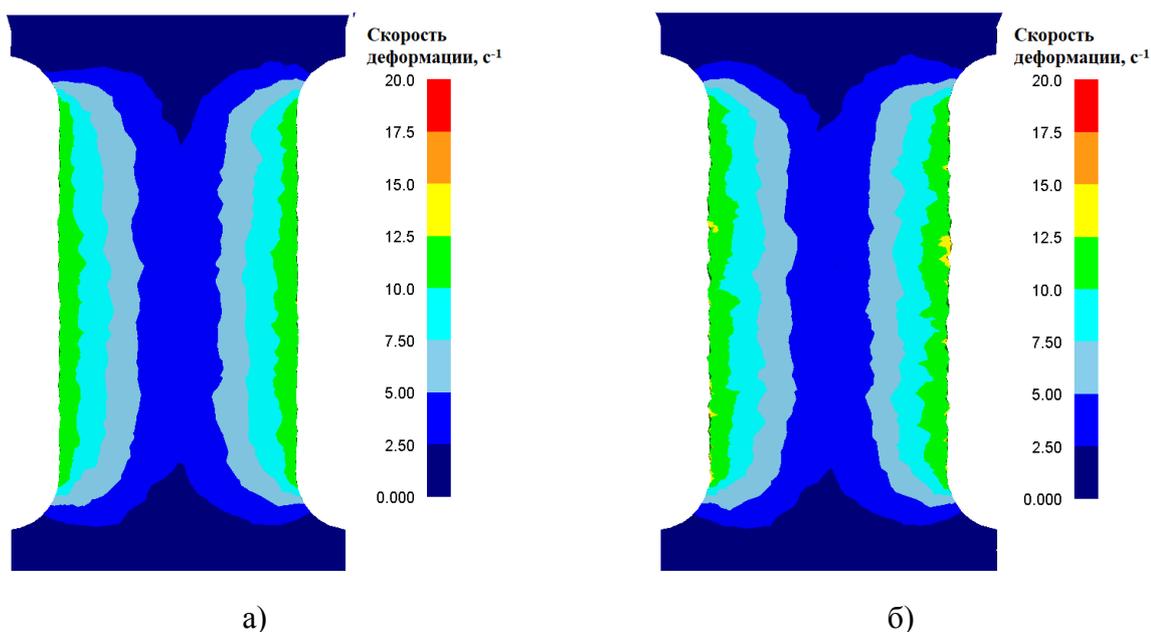


Рис. 18. Распределение скорости деформаций для сплава АМГ5М при температуре 350°С и скорости деформации 700 об/мин: а) - 1 оборот; б) - 1.5 оборота

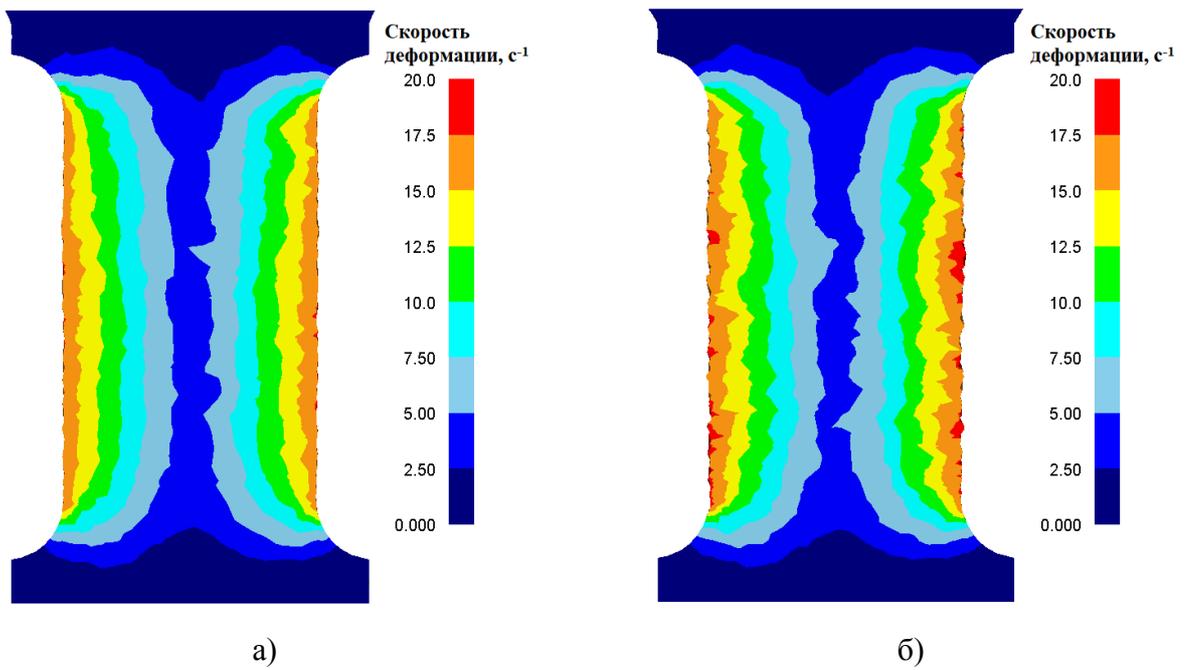


Рис. 19. Распределение скорости деформаций для сплава АМГ5М при температуре 350°C и скорости деформации 1000 об/мин: а) - 1 оборот; б) - 1.5 оборота

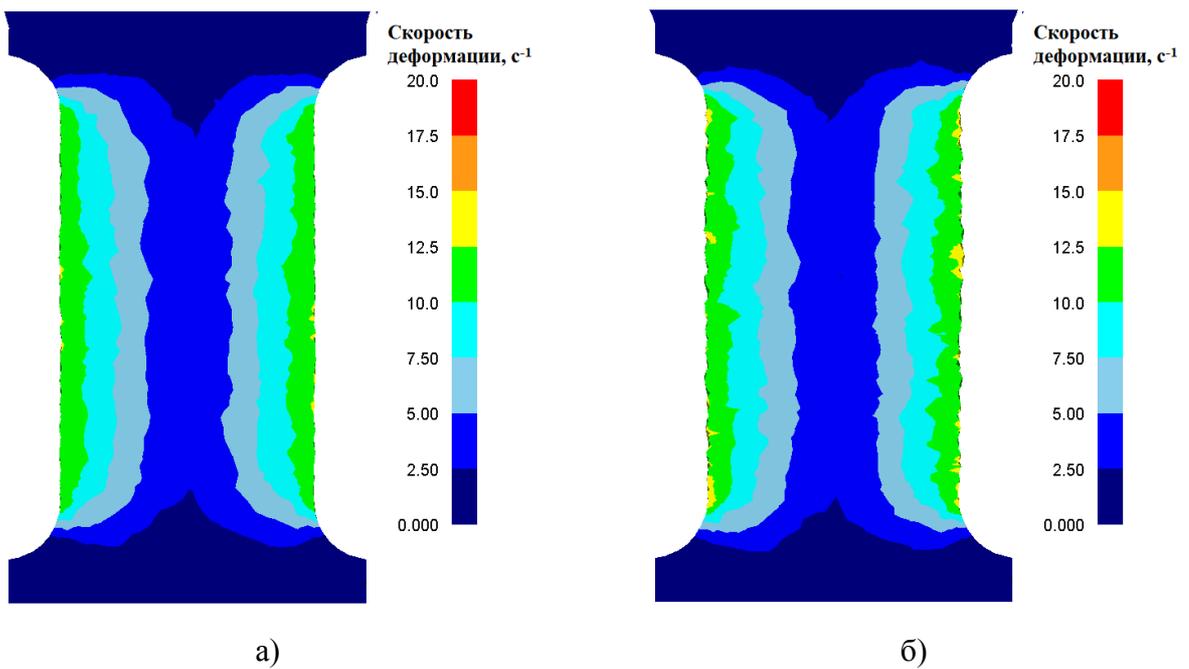


Рис. 20. Распределение скорости деформаций для сплава АМГ5М при температуре 500°C и скорости деформации 700 об/мин: а) - 1 оборот; б) - 1.5 оборота

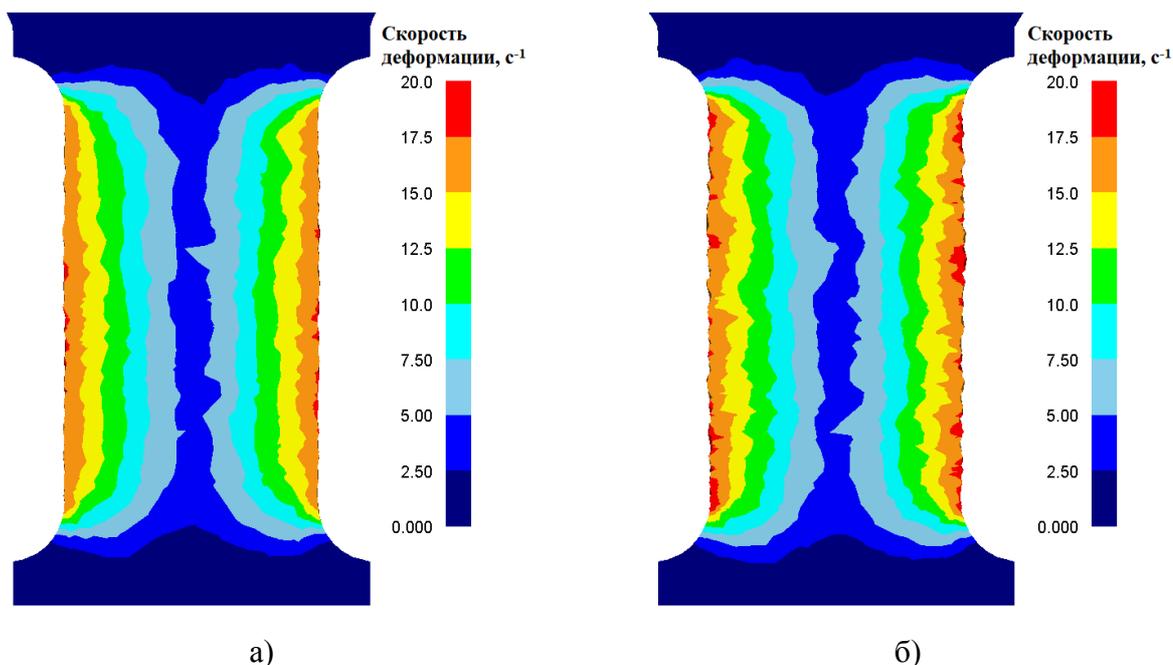


Рис. 21. Распределение скорости деформаций для сплава АМГ5М при температуре 500°С и скорости деформации 1000 об/мин: а) - 1 оборот; б) - 1.5 оборота

Из рисунков 18-21 видно, что характер распределения скоростей деформаций на всех образцах очень похож. В приповерхностных слоях, как и ожидалось, возникают наибольшие скорости деформации.

С увеличением количества оборотов увеличивается зона с максимальными скоростями деформации. При увеличении скорости кручения увеличиваются значения скорости деформации. При повышении температуры скорости деформации становятся меньше.

Обобщенные данные по расчетам скоростей деформации в приповерхностных слоях представлены в таблице 3.

Таблица 3. Расчетные значения скоростей деформации для сплава А5Н

Температура, °С	Количество оборотов	Скорость, об/мин	Скорость деформации, с ⁻¹
350	1	700	10-12
		1000	13-17,5
	1,5	700	10-12
		1000	13-17,5
500	1	700	8-12
		1000	13-18
	1,5	700	8-12
		1000	13-18

Результаты расчетов деформационной задачи для сплава АМГ5М

На рисунках 14-17 представлены расчеты распределения интенсивности напряжений для сплава АМГ5М в соответствии с планом эксперимента.

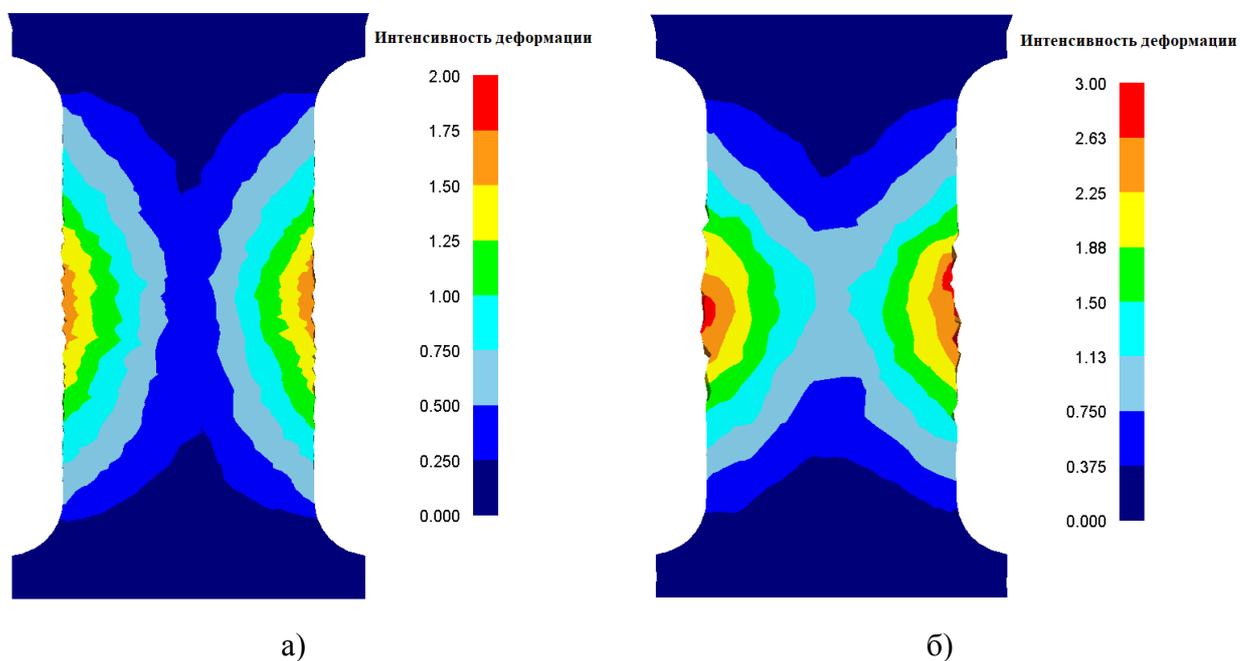


Рис. 22. Распределение интенсивности деформаций для сплава АМГ5М при температуре 350°C и скорости деформации 700 об/мин: а) - 1 оборот; б) - 1.5 оборота

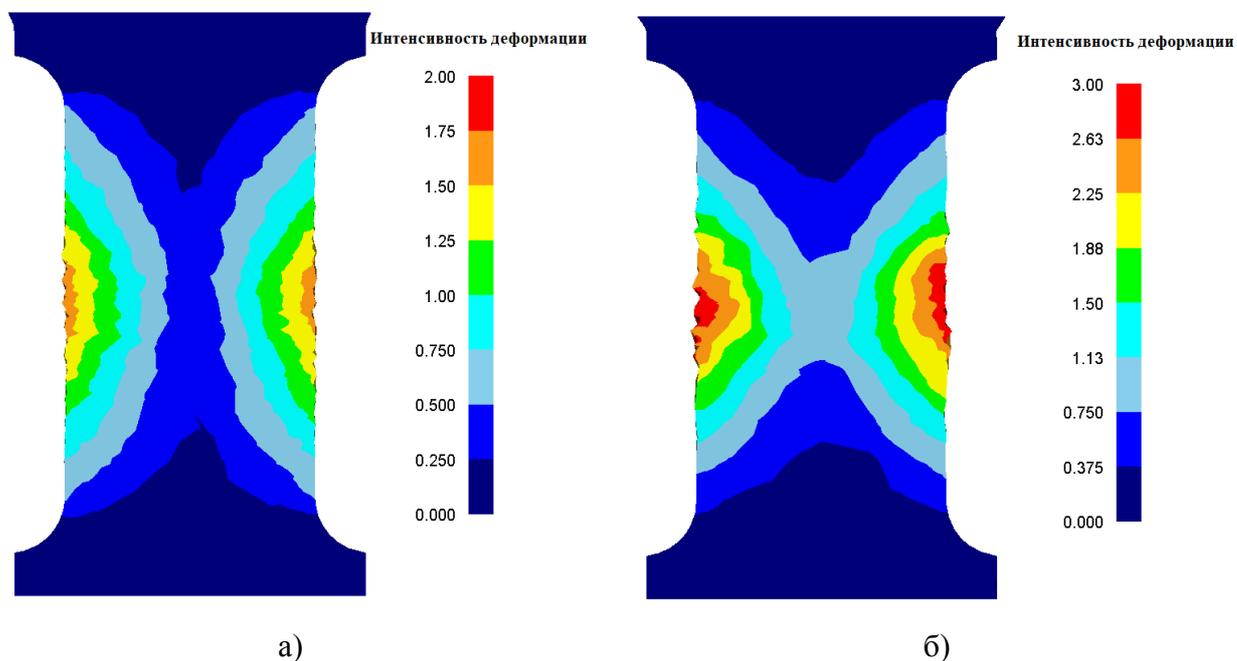


Рис. 23. Распределение интенсивности деформаций для сплава АМГ5М при температуре 350°C и скорости деформации 1000 об/мин: а) - 1 оборот; б) - 1.5 оборота

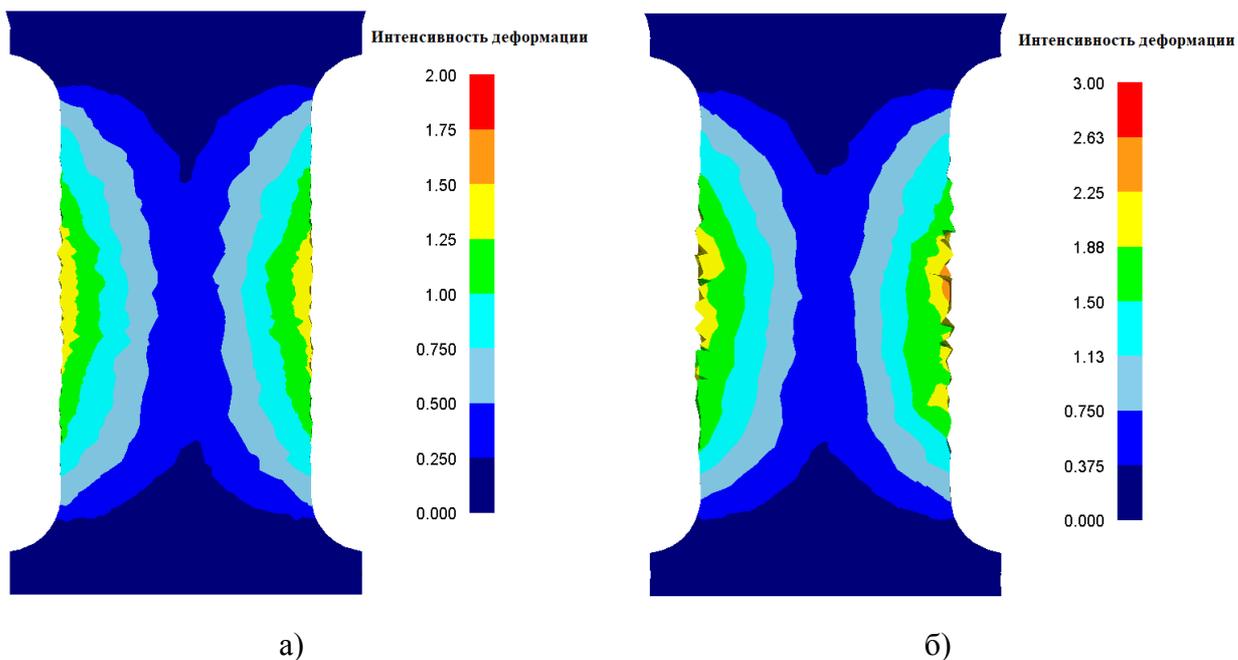


Рис. 24. Распределение интенсивности деформаций для сплава АМГ5М при температуре 500°С и скорости деформации 700 об/мин: а) - 1 оборот; б) - 1.5 оборота

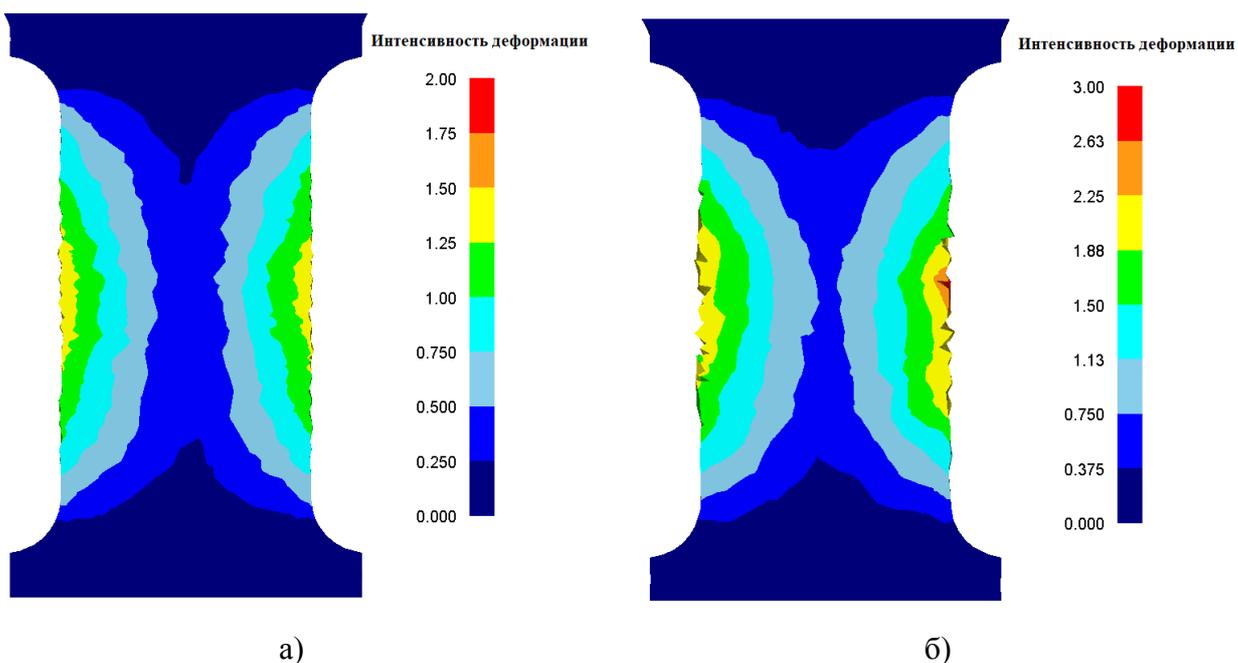


Рис. 25. Распределение интенсивности деформаций для сплава АМГ5М при температуре 500°С и скорости деформации 1000 об/мин: а) - 1 оборот; б) - 1.5 оборота

Из рисунков 22-25 видно, что характер распределения деформации на всех образцах очень похож. В приповерхностных слоях интенсивность деформации достигает 1-1,5 для одного оборота и 1,5-2,25 для полутора оборотов. На рисунке 22 б) и 23 б) есть некоторые зоны со степенью деформации около 3, но эти зоны очень малы, и в расчет их можно не брать.

На рисунках 26-29 представлены расчеты распределения интенсивности напряжений для сплава АМГ5М в соответствии с планом эксперимента.

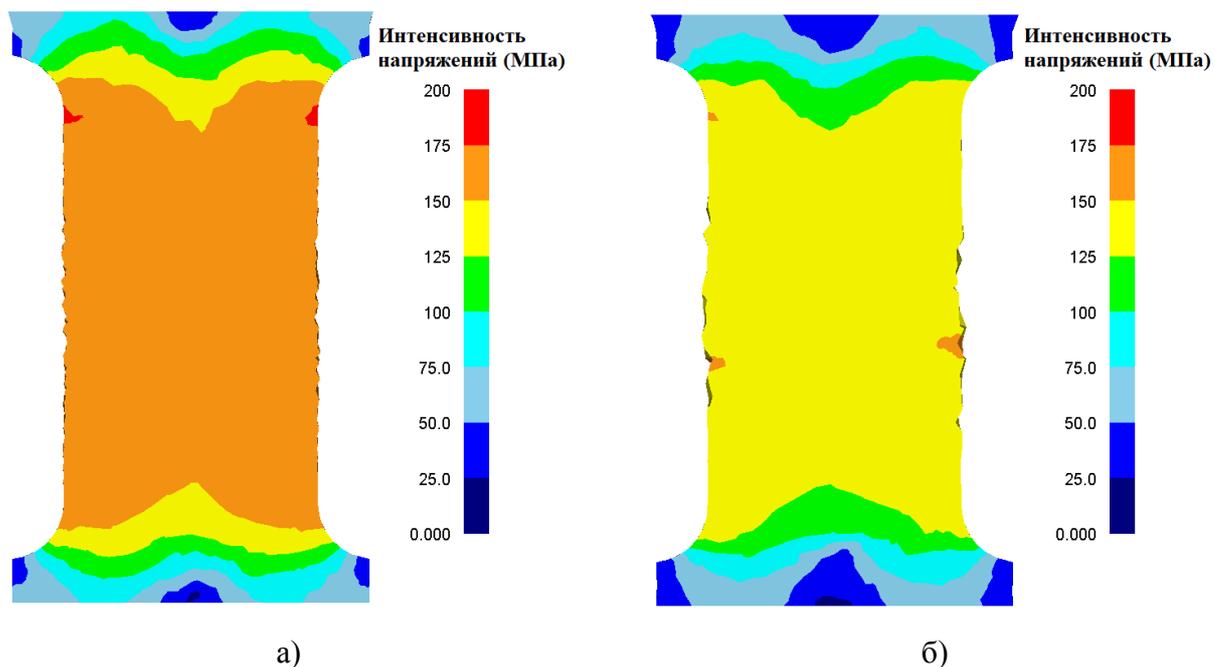


Рис. 26. Распределение интенсивности напряжений для сплава АМГ5М при температуре 350°C и скорости деформации 700 об/мин: а) - 1 оборот; б) - 1.5 оборота

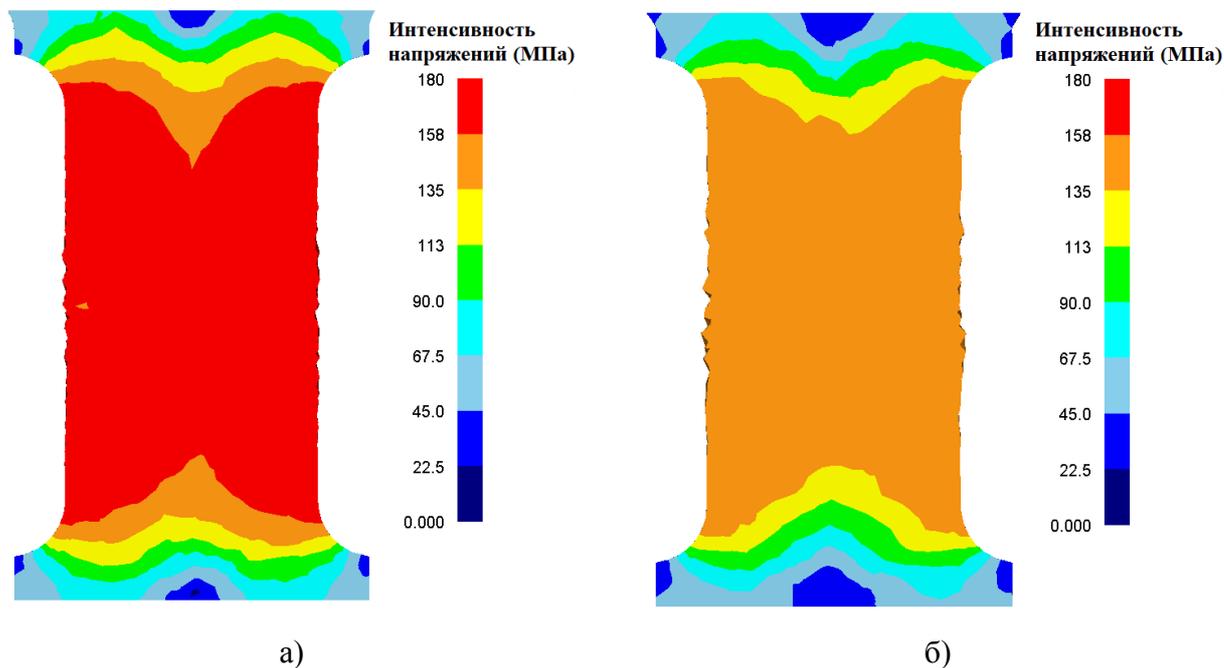


Рис. 27. Распределение интенсивности напряжений для сплава АМГ5М при температуре 350°C и скорости деформации 1000 об/мин: а) - 1 оборот; б) - 1.5 оборота

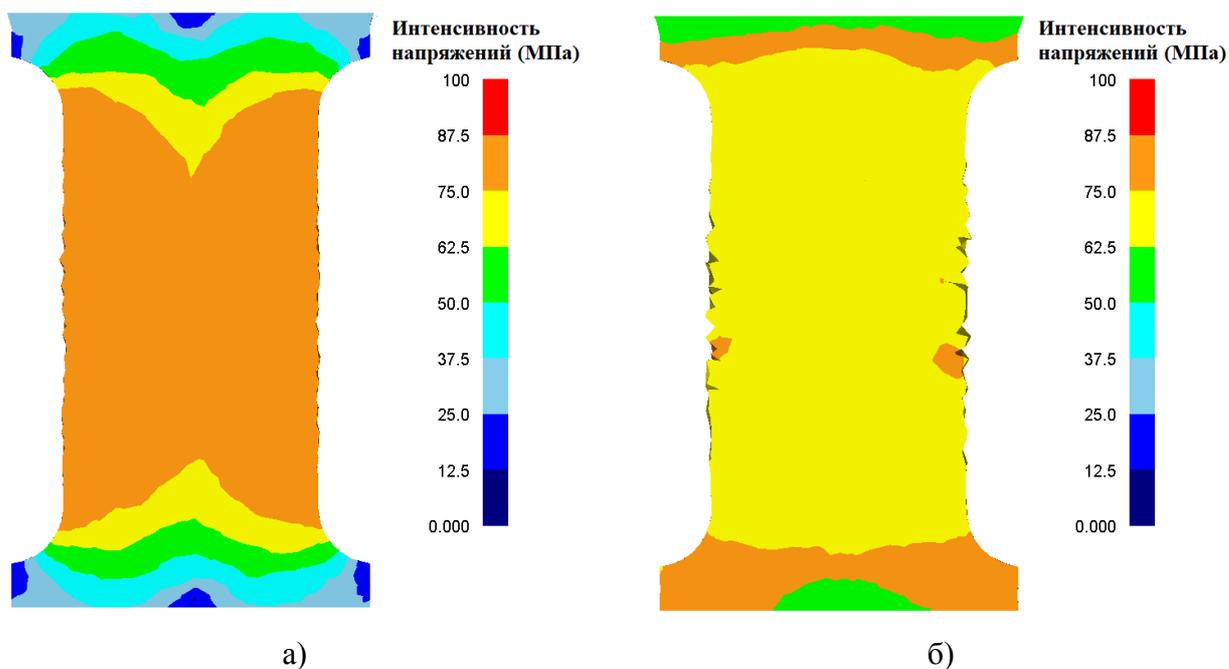


Рис. 28. Распределение интенсивности напряжений для сплава АМГ5М при температуре 500°C и скорости деформации 700 об/мин: а) - 1 оборот; б) - 1.5 оборота

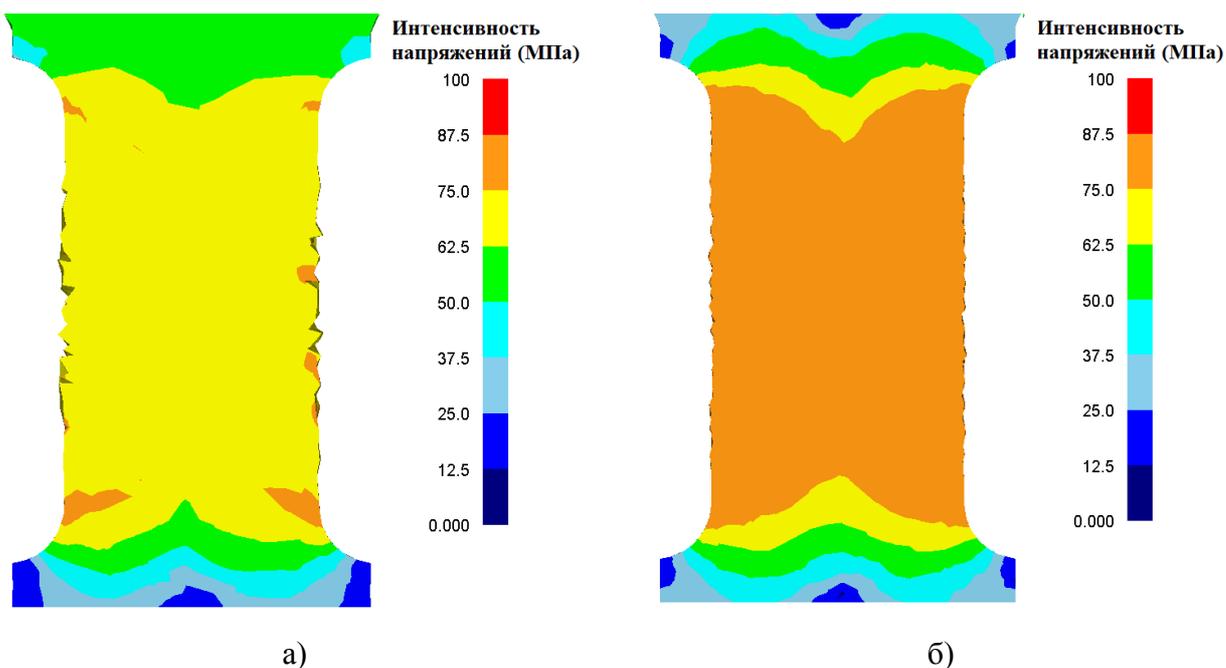


Рис. 29. Распределение интенсивности напряжений для сплава АМГ5М при температуре 500°C и скорости деформации 1000 об/мин: а) - 1 оборот; б) - 1.5 оборота

Из рисунков 26-29 видно, что характер распределения напряжений на всех образцах очень похож. Распределение напряжений равномерно по всему образцу. Видно, что с повышением температуры, интенсивность напряжения снижается. Стоит отметить, что при температуре 350°C с увеличением степени деформации происходит некоторое снижение интенсивности напряжений, это

связано с процессами релаксации, а при увеличении скорости деформации напряжения увеличиваются, это вызвано процессами рекристаллизации. Однако при температуре 500°C данные выводы не совсем справедливы, это связано с тем что такая высокая температура способствует более быстрому протеканию процессов релаксации.

Обобщенные данные по расчетам интенсивности напряжений в приповерхностных слоях представлены в таблице 4.

Таблица 4. Расчетные значения интенсивности напряжений для сплава АМГ5М

Температура, °С	Количество оборотов	Скорость, об/мин	Интенсивность напряжений, МПа
350	1	700	150-175
		1000	160-180
	1,5	700	125-150
		1000	135-160
500	1	700	75-90
		1000	75-90
	1,5	700	60-75
		1000	60-75

На рисунках 30-33 представлены расчеты распределения скорости деформаций для сплава А5Н в соответствии с планом эксперимента.

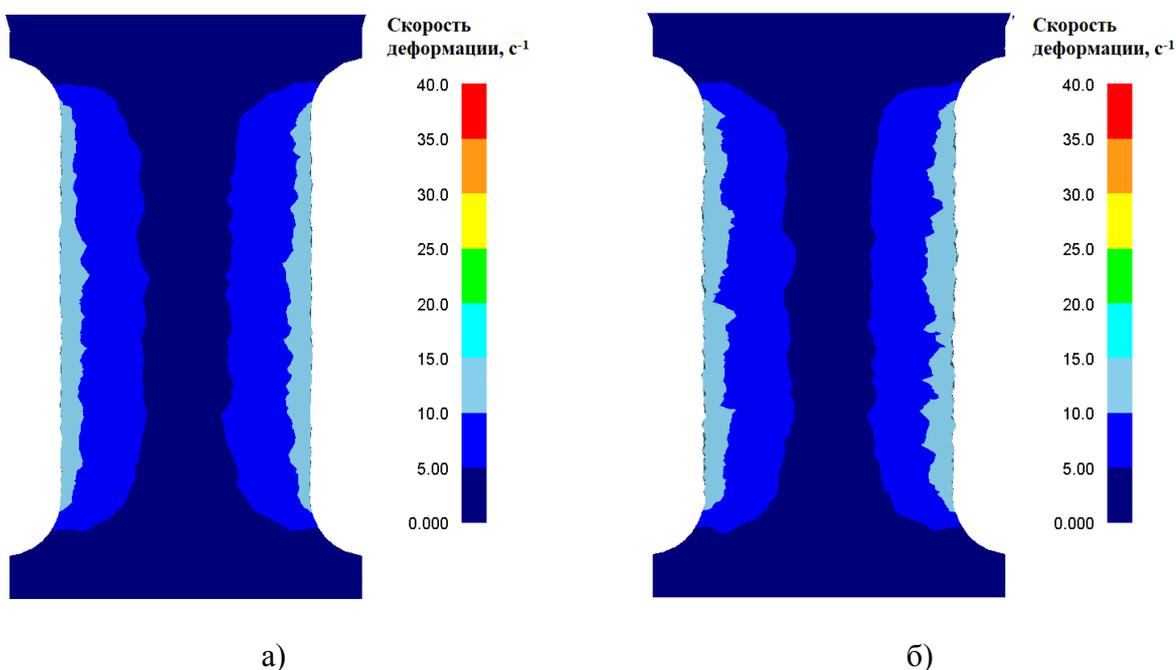


Рис. 30. Распределение скорости деформаций для сплава АМГ5М при температуре 350°C и скорости деформации 700 об/мин: а) - 1 оборот; б) - 1.5 оборота

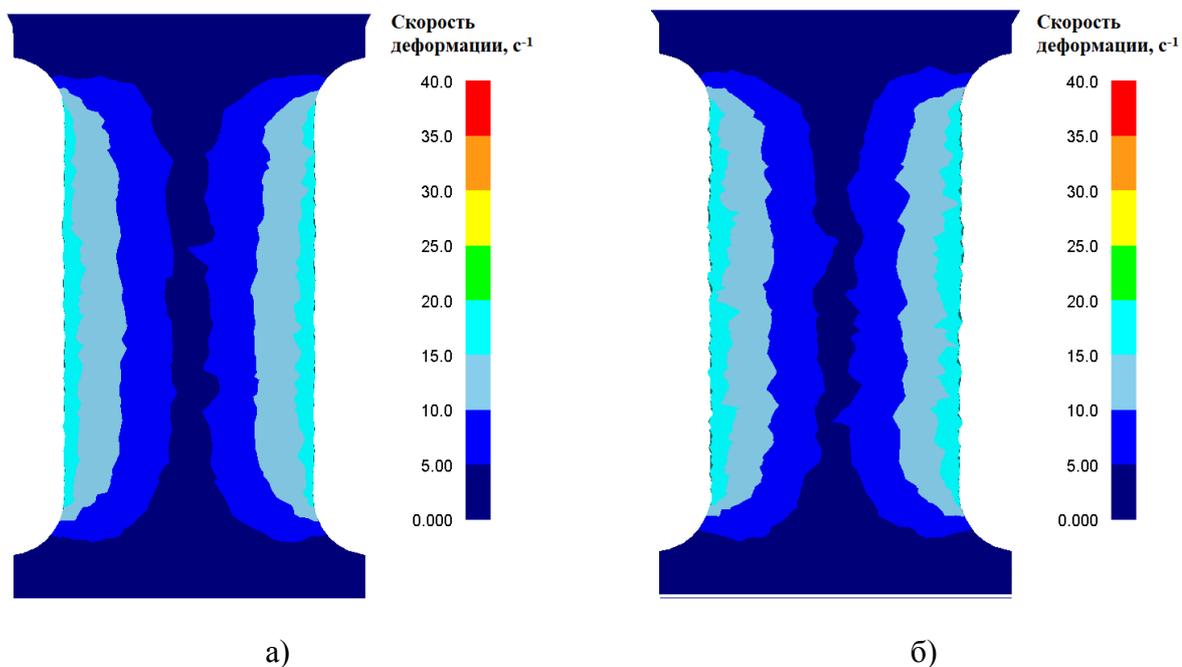


Рис. 31. Распределение скорости деформаций для сплава АМГ5М при температуре 350°C и скорости деформации 1000 об/мин: а) - 1 оборот; б) - 1.5 оборота

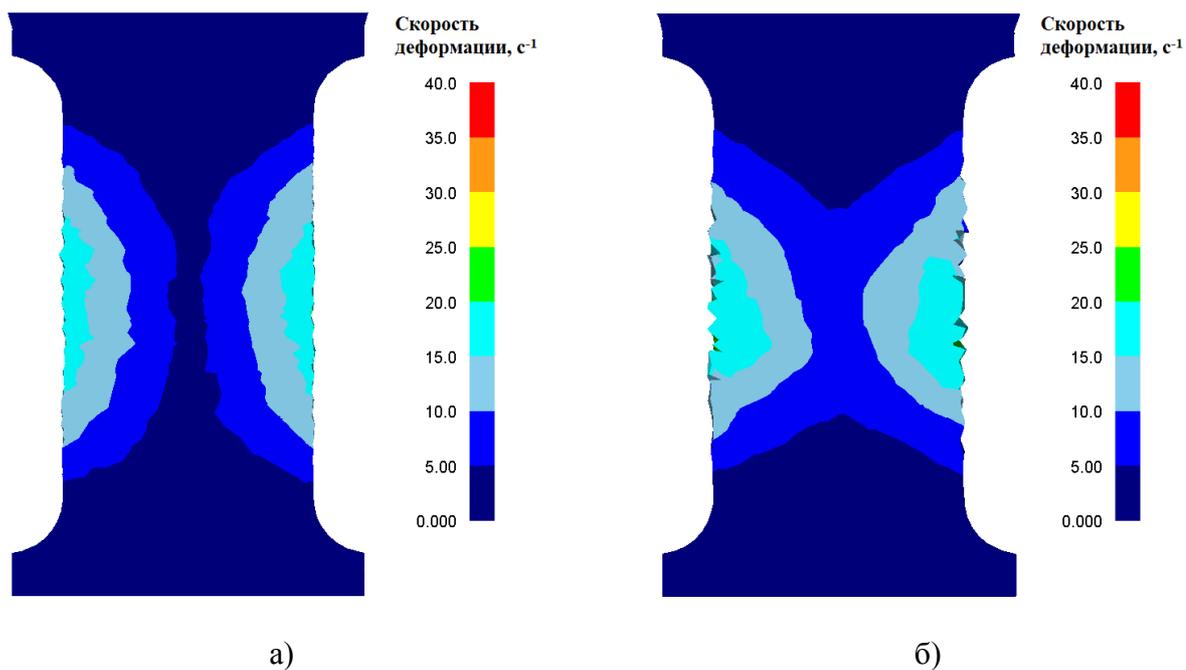


Рис. 32. Распределение скорости деформаций для сплава АМГ5М при температуре 500°C и скорости деформации 700 об/мин: а) - 1 оборот; б) - 1.5 оборота

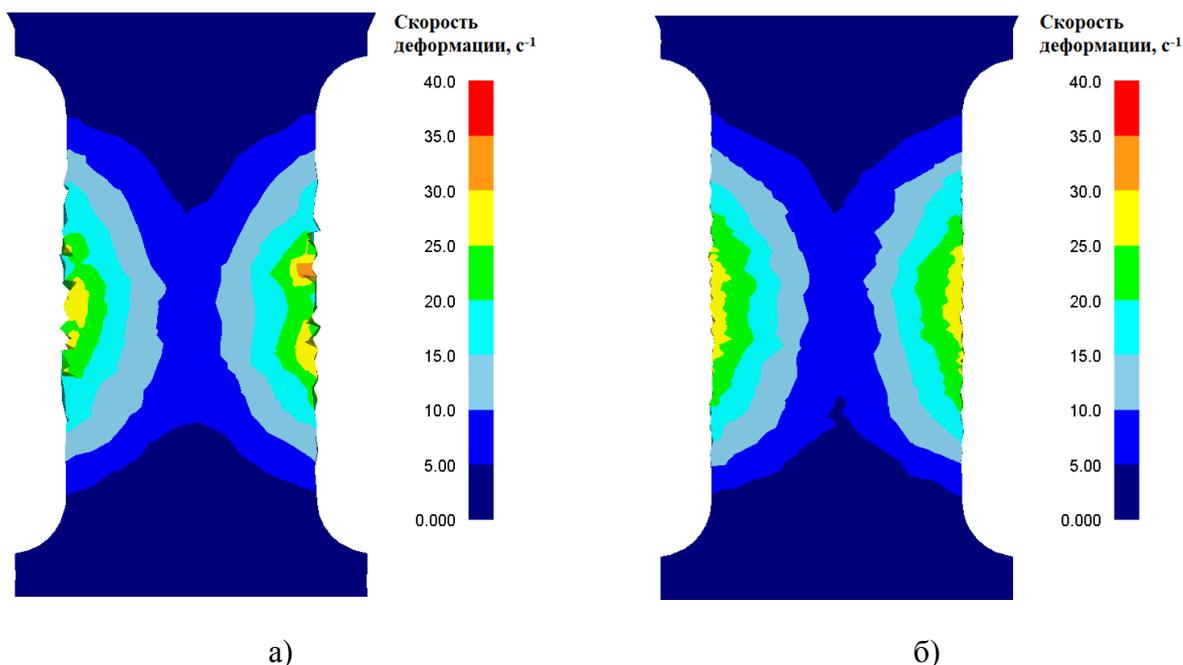


Рис. 33. Распределение скорости деформаций для сплава АМГ5М при температуре 500°С и скорости деформации 1000 об/мин: а) - 1 оборот; б) - 1.5 оборота

Из рисунков 30-33 видно, что характер распределения скоростей деформаций на всех образцах очень похож. В приповерхностных слоях, как и ожидалось, возникают наибольшие скорости деформации.

С увеличением количества оборотов увеличивается зона с максимальными скоростями деформации. При увеличении скорости кручения увеличиваются значения скорости деформации. При повышении температуры скорости деформации становятся меньше. Значения интенсивности скоростей напряжений находятся в пределах 15-20 с^{-1} . Это справедливо для всех проведенных расчетов, кроме расчета при температуре 500°С при скорости вращения 1000 об/мин, тут значения немного выше и находятся в пределах 25-30 с^{-1} . Возможно это связано с тем, что для данной температуры и скорости кручения были самые низкие значения интенсивности напряжений, т.е. причина в релаксации, вследствие чего возникают более высокие скорости деформаций

Результаты расчетов деформационной задачи для сплава Д16АТ

На рисунках 34-37 представлены расчеты распределения интенсивности деформаций для сплава Д16АТ в соответствии с планом эксперимента.

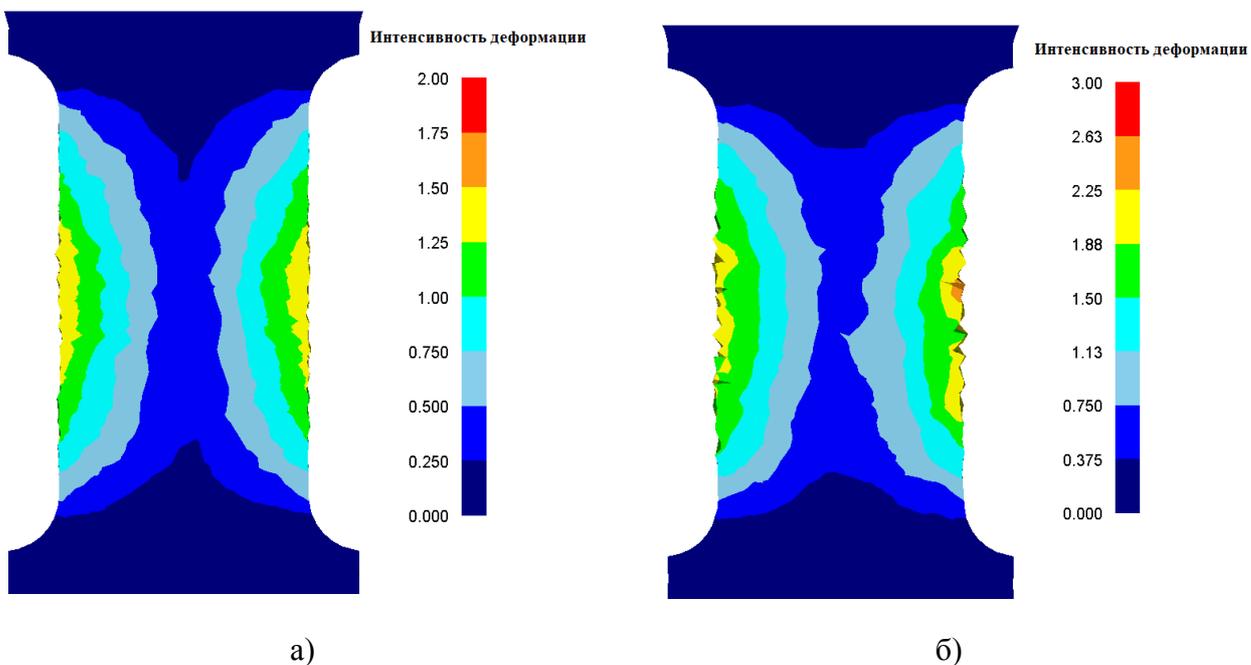


Рис. 34. Распределение интенсивности деформаций для сплава Д16АТ при температуре 350°C и скорости деформации 700 об/мин: а) - 1 оборот; б) - 1.5 оборота

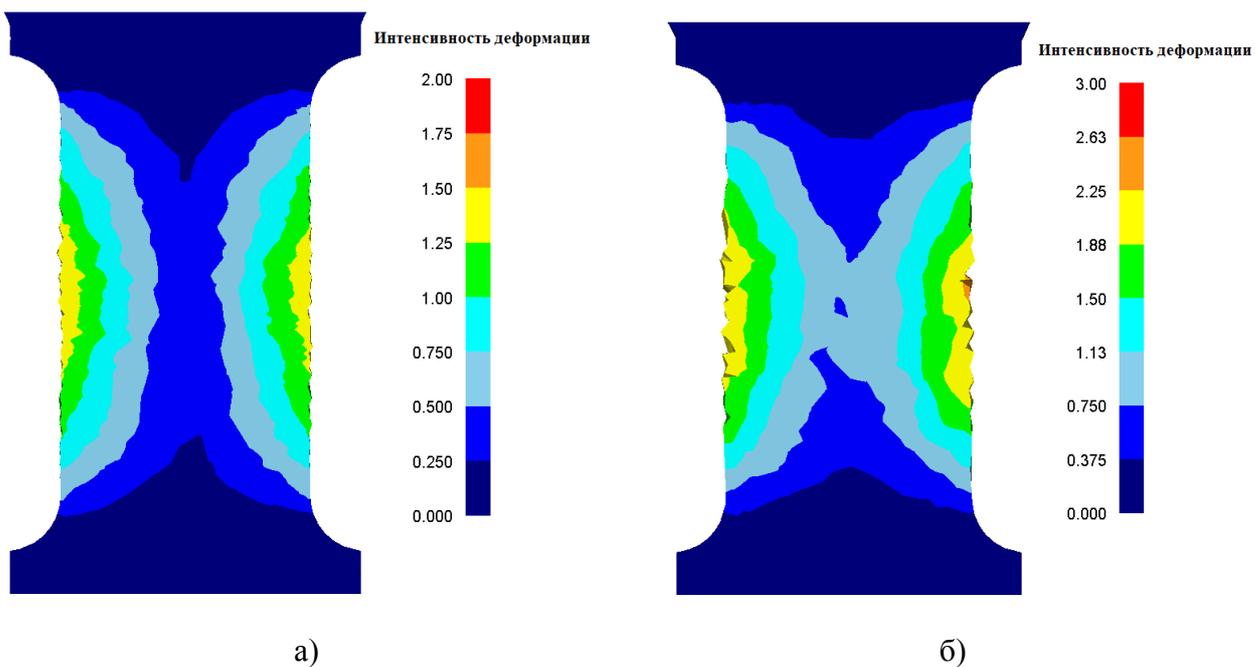


Рис. 35. Распределение интенсивности деформаций для сплава Д16АТ при температуре 350°C и скорости деформации 1000 об/мин: а) - 1 оборот; б) - 1.5 оборота

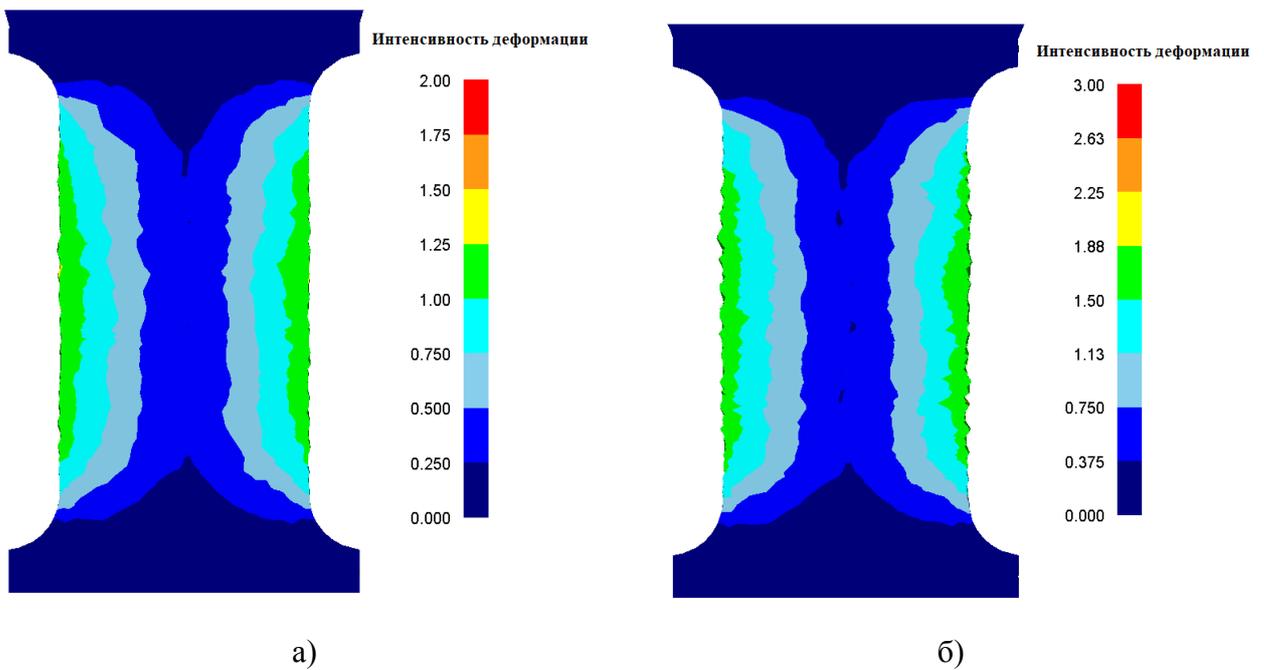


Рис. 36. Распределение интенсивности деформаций для сплава Д16АТ при температуре 500°С и скорости деформации 700 об/мин: а) - 1 оборот; б) - 1.5 оборота

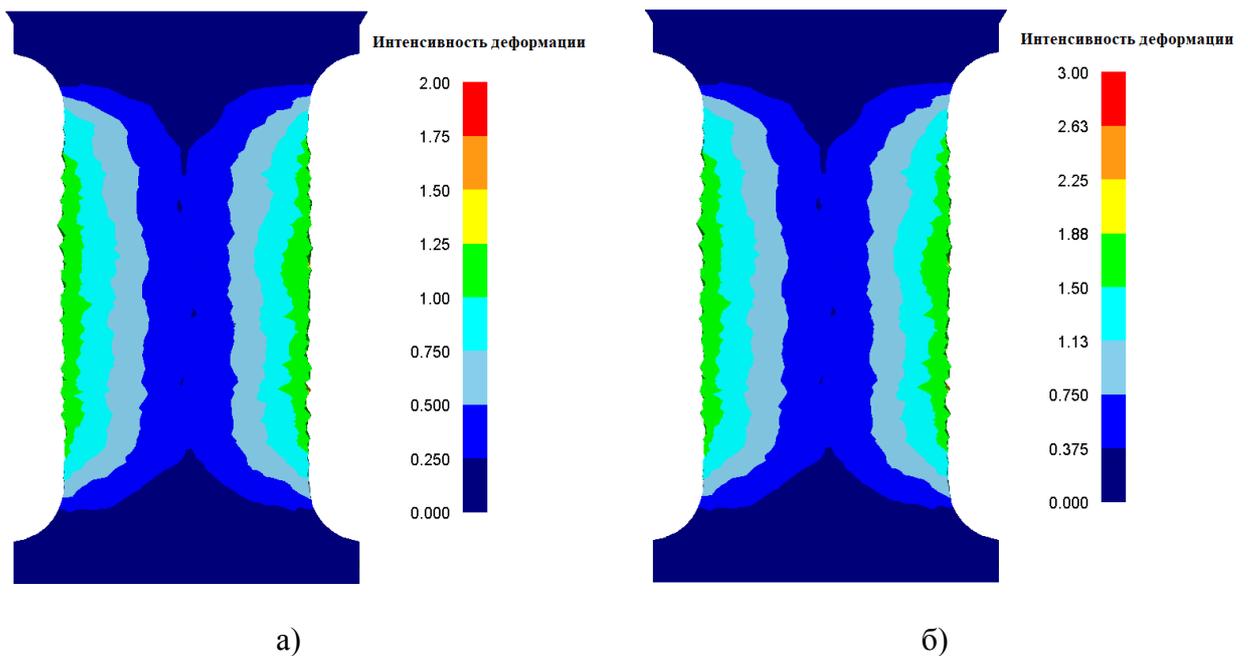


Рис. 37. Распределение интенсивности деформаций для сплава Д16АТ при температуре 500°С и скорости деформации 1000 об/мин: а) - 1 оборот; б) - 1.5 оборота

Из рисунков 34-37 видно, что характер распределения деформации на всех образцах одинаковый. В приповерхностных слоях интенсивность деформации достигает 0,8-1,3 для одного оборота и 1,5-2 для полутора оборотов, что соответствует расчетным значениям, полученным при физическом моделировании.

Видно, что наибольшая величина деформации возникает в приповерхностных слоях.

На рисунках 38-41 представлены расчеты распределения интенсивности напряжений для сплава Д16АТ в соответствии с планом эксперимента.

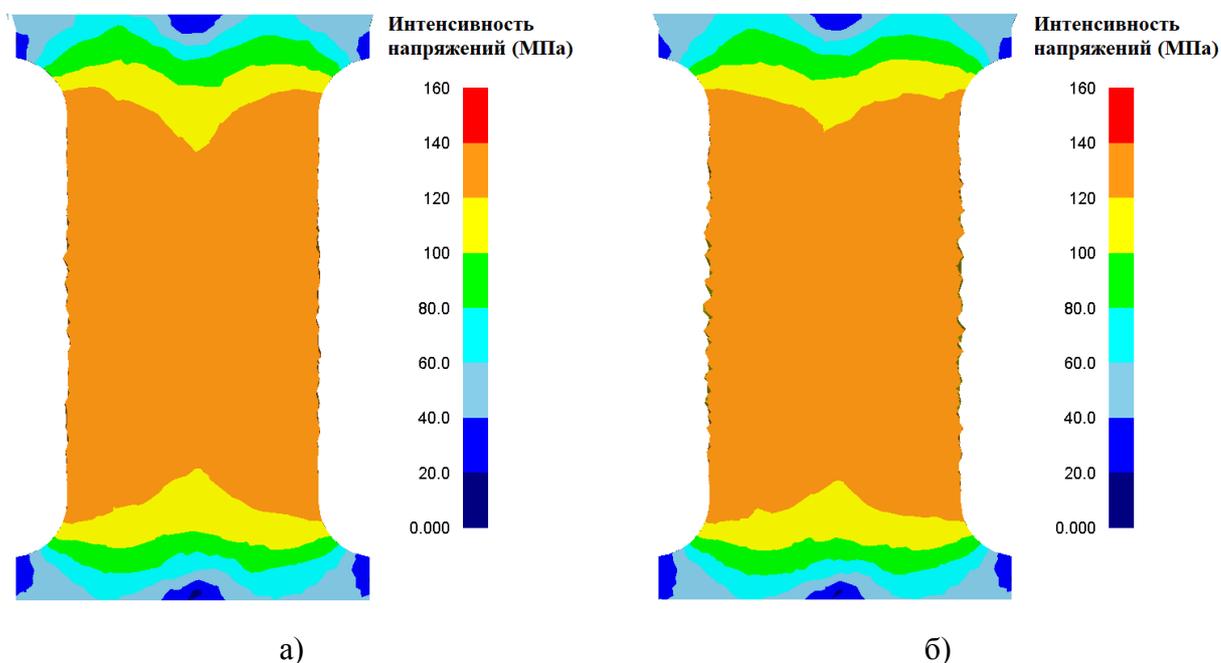


Рис. 38. Распределение интенсивности напряжений для сплава Д16АТ при температуре 350°C и скорости деформации 700 об/мин: а) - 1 оборот; б) - 1.5 оборота

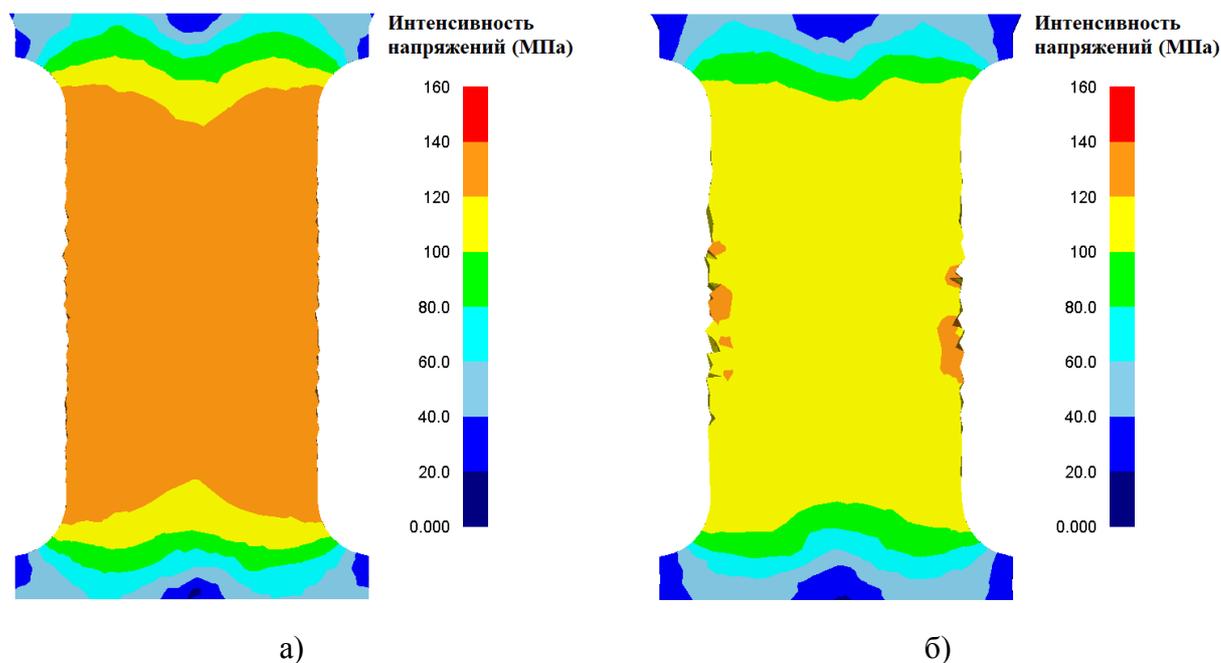


Рис. 39. Распределение интенсивности напряжений для сплава Д16АТ при температуре 350°C и скорости деформации 1000 об/мин: а) - 1 оборот; б) - 1.5 оборота

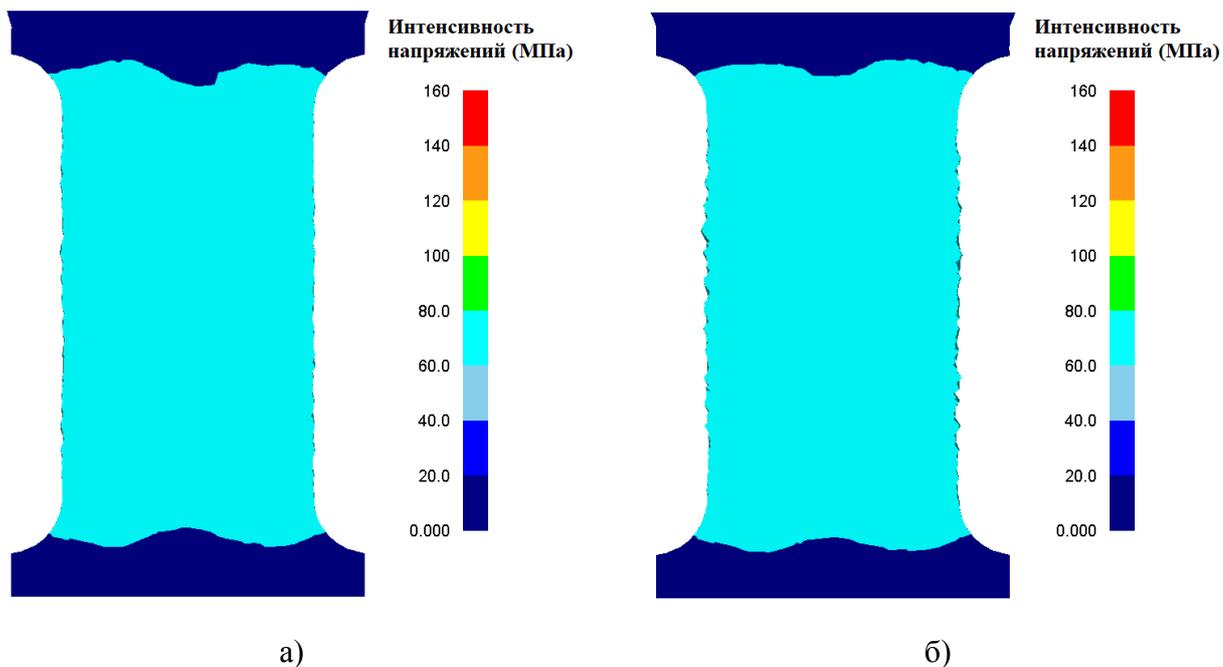


Рис. 40. Распределение интенсивности напряжений для сплава Д16АТ при температуре 500°С и скорости деформации 700 об/мин: а) - 1 оборот; б) - 1.5 оборота

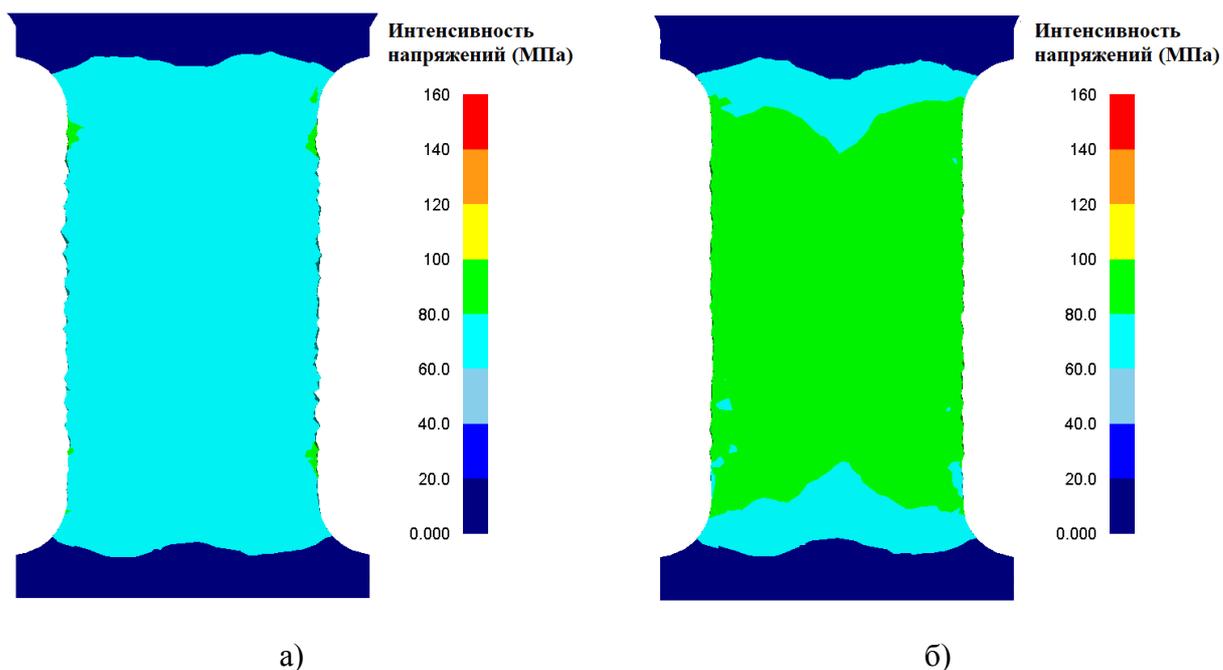


Рис. 41. Распределение интенсивности напряжений для сплава Д16АТ при температуре 500°С и скорости деформации 1000 об/мин: а) - 1 оборот; б) - 1.5 оборота

Из рисунков 38-41 видно, что характер распределения напряжений на всех образцах очень похож. Распределение напряжений равномерно по всему образцу. Значения интенсивности напряжений для всех образцов примерно одинаковы. Есть 2 эксперимента в которых значения отличаются от остальных: первое при 500°С, 1 оборот, здесь хочется сделать такой вывод, что

при данных параметрах преобладают процессы рекристаллизации в то время как для остальных, процессы рекристаллизации и динамического возврата происходят одновременно и как бы компенсируют друг друга., и второе это при 350°C, 1,5 оборота, 1000 об/мин, здесь наблюдается обратная картина, процессы динамического возврата происходят быстрее процессов рекристаллизации.

Обобщенные данные по расчетам интенсивности напряжений в приповерхностных слоях представлены в таблице 4.

Таблица 5. Расчетные значения интенсивности напряжений для сплава Д16АТ

Температура, °С	Количество оборотов	Скорость, об/мин	Интенсивность напряжений, МПа
350	1	700	140
		1000	140
	1,5	700	140
		1000	120
500	1	700	80
		1000	100
	1,5	700	80
		1000	80

На рисунках 42-45 представлены расчеты распределения скорости деформаций для сплава Д16АТ в соответствии с планом эксперимента.

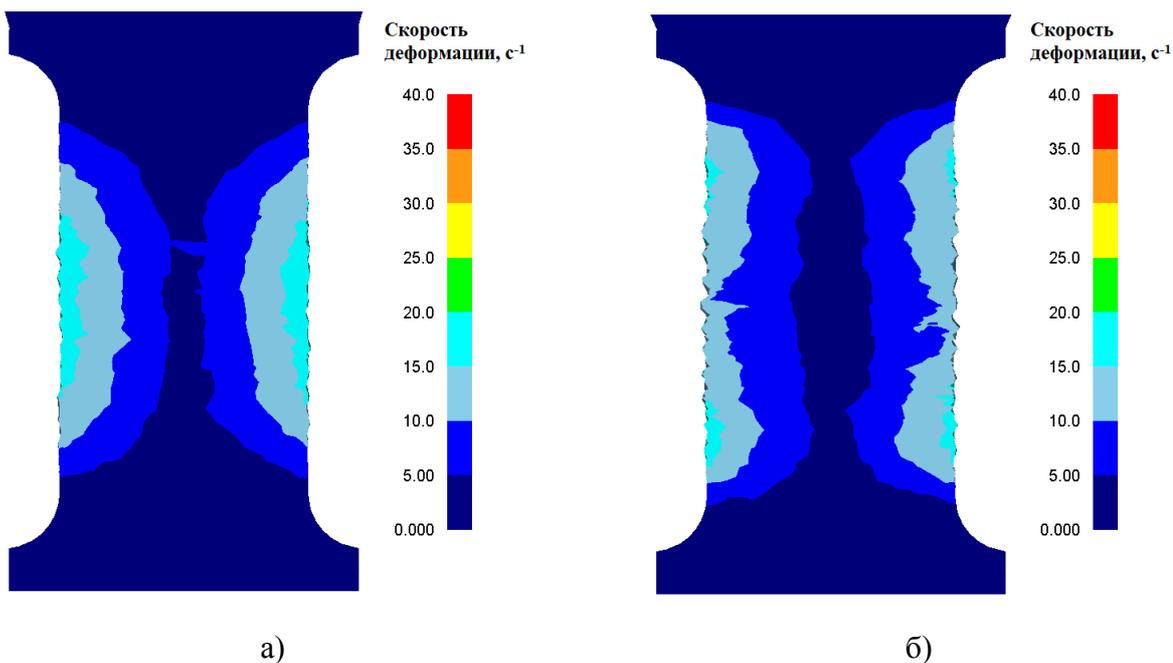


Рис. 42. Распределение скорости деформаций для сплава Д16АТ при температуре 350°C и скорости деформации 700 об/мин: а) - 1 оборот; б) - 1.5 оборота

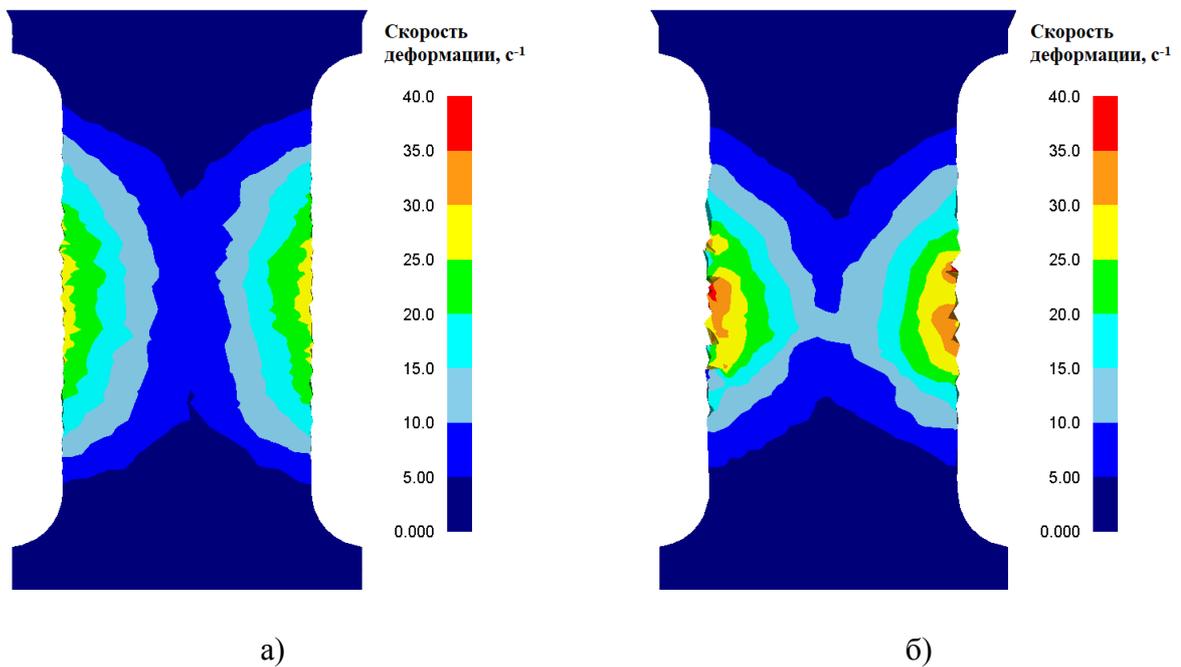


Рис. 43. Распределение скорости деформаций для сплава Д16АТ при температуре 350°C и скорости деформации 1000 об/мин: а) - 1 оборот; б) - 1.5 оборота

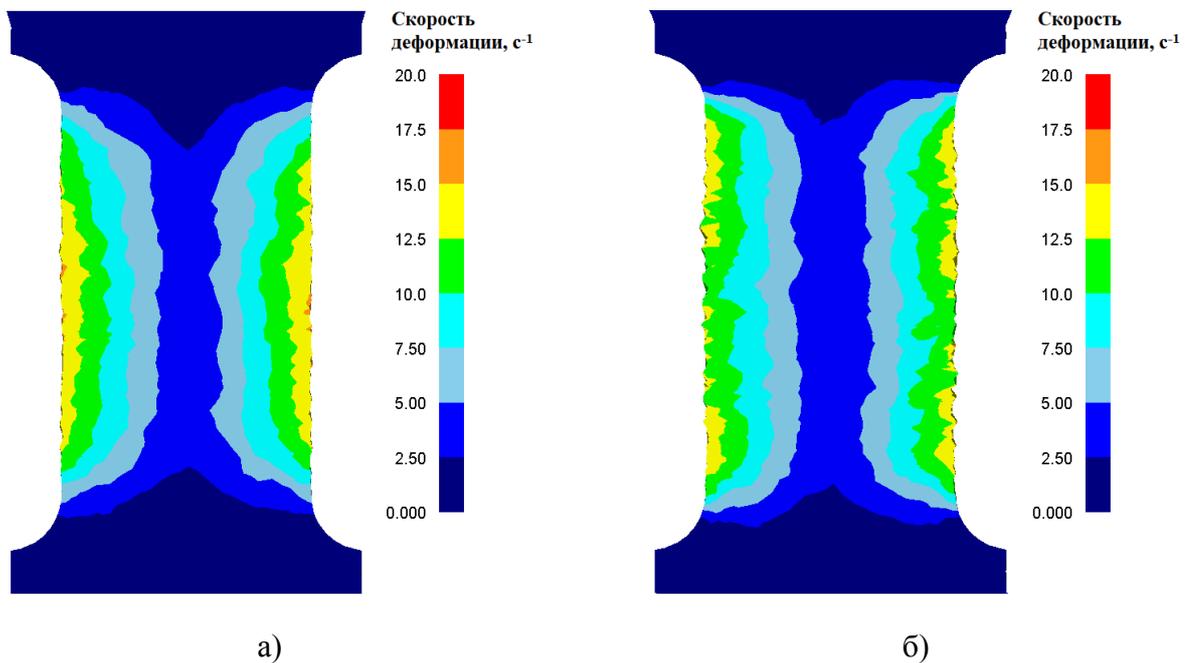


Рис. 44. Распределение скорости деформаций для сплава Д16АТ при температуре 500°C и скорости деформации 700 об/мин: а) - 1 оборот; б) - 1.5 оборота

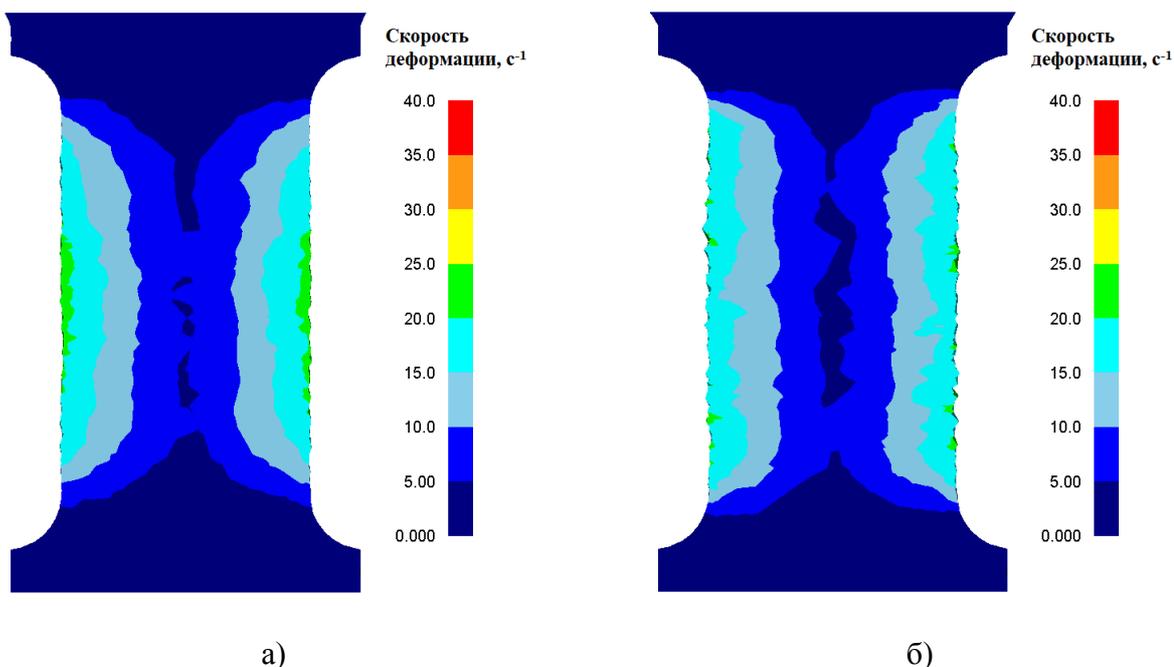


Рис. 45. Распределение скорости деформаций для сплава Д16АТ при температуре 500°С и скорости деформации 1000 об/мин: а) - 1 оборот; б) - 1.5 оборота

Из рисунков 30-33 видно, что характер распределения скоростей деформаций на всех образцах очень похож. В приповерхностных слоях, как и ожидалось, возникают наибольшие скорости деформации.

С увеличением количества оборотов увеличивается зона с максимальными скоростями деформации. При увеличении скорости кручения увеличиваются значения скорости деформации. При повышении температуры скорости деформации становятся меньше. Значения интенсивности скоростей напряжений находятся в пределах 15-20 с⁻¹.

Выводы по результатам метаматематического моделирования.

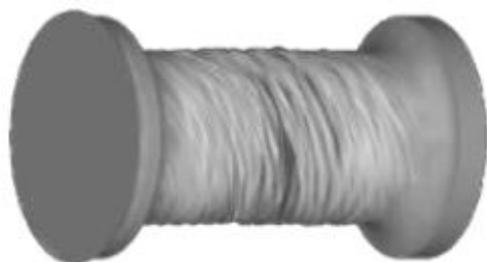
Материал, температура, скорость и степень деформации влияют на поведение материалов в процессе испытаний на кручение и прочностные характеристики, определяемые при этих испытаниях.

Прочностные характеристики сплава АМг5М при кручении оказались несколько выше, чем у сплава Д16АТ и А5Н, однако при росте скорости и степени деформации его свойства относительно быстро снижаются, тогда как кривая напряжений Д16АТ более стабильна при тех значениях степени и

скорости деформации, которые были рассмотрены в ходе эксперимента. Наибольшее влияние на вид кривой напряжение-деформация оказывает температура испытаний. Повышение температуры испытаний с 350°C до 500°C изменило значения сопротивления кручению в среднем на 40%. Материалы не одинаково ведут себя при увеличении скорости деформации при кручении: увеличение частоты вращения с 10 до 15 с⁻¹ приводит к снижению сопротивления на кручение в сплаве Д16 и увеличению этой характеристики для сплава АМг5.

Сравнение результатов физического и математического моделирования

Первое что хотелось бы отметить после проведения физического и математического моделирования, это схожесть образцов после кручения, на рисунке 45 представлено сравнение поверхности, видно четкое спиральное закручивание, которое является типичной характеристикой экспериментов на кручение.



а)



б)

Рис. 45. Визуальное сравнение математического (а) и физического моделирования (б) для материала А5Н показывает похожие спиральные закручивание на поверхности.

По результатам физического и численного моделирования получены зависимости эффективного напряжения от эффективной деформации при кручении.

Во время физического моделирования значения напряжений регистрировались для всего рабочего пространства образца, а во время математического моделирования мы можем оценить уровень напряжений для каждого узла конечно-элементной сетки. Поэтому в данном исследовании точка P2 в центре поверхности рабочего пространства образца, показанная на рисунке 46, была выбрана для построения кривых эффективного напряжения - эффективные деформации. В центре на поверхности образца, по результатам моделирования, наблюдались самые высокие значения напряжений.



Рис. 46. Расчетная точка P2 на поверхности образца для получения уровня значений напряжений и деформаций

Кривые эффективное напряжение - эффективная деформация представлены на рисунках 47-49.

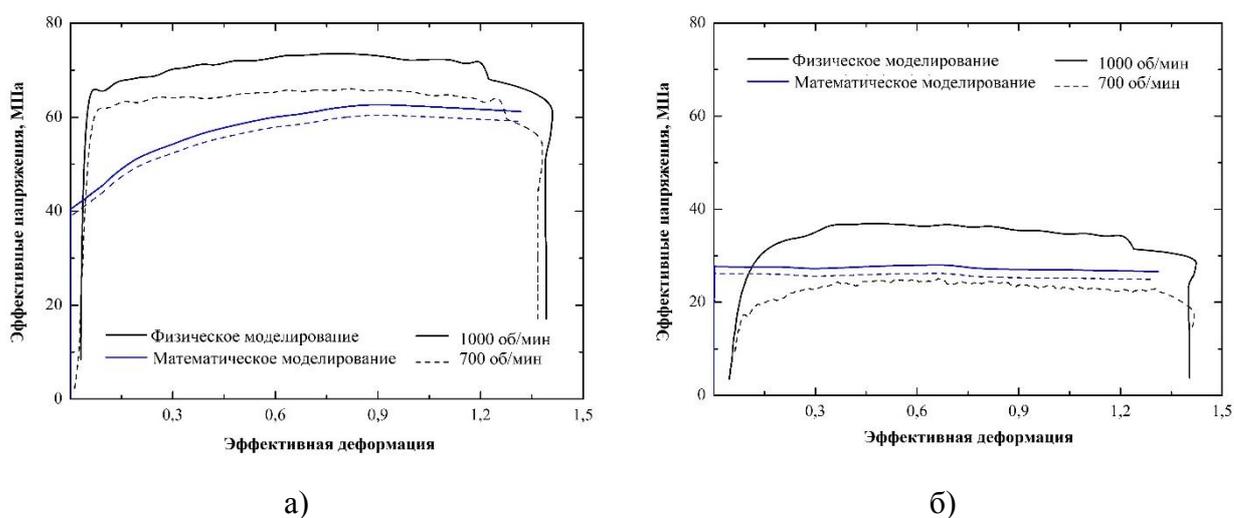


Рис. 47. Кривые эффективное напряжение - эффективная деформация при кручении сплава А5Н при а) 350°С, б) 500°С

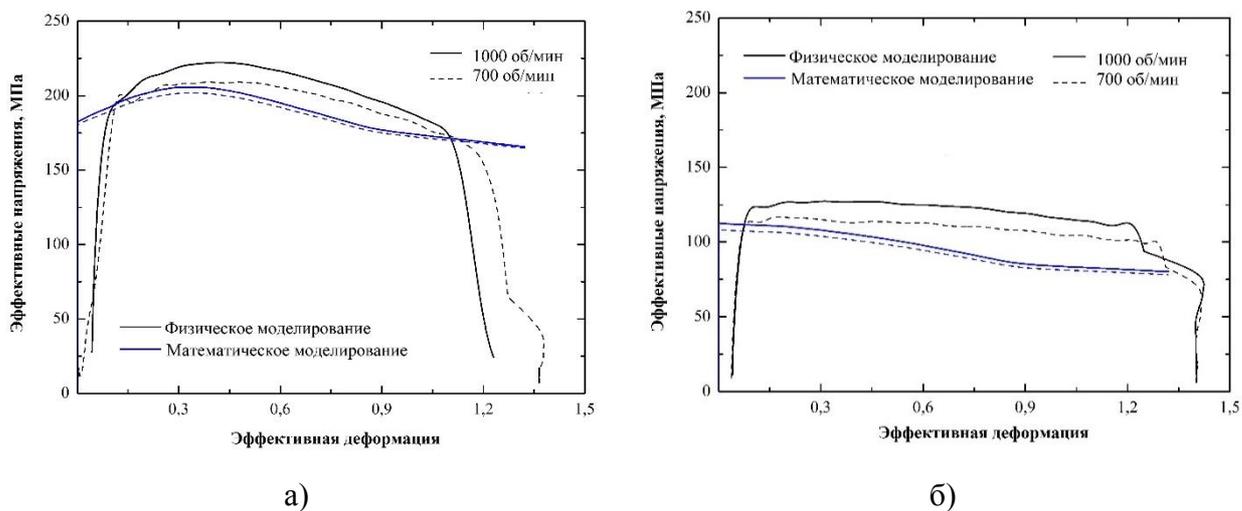


Рис. 48. Кривые эффективное напряжение - эффективная деформация при кручении сплава АМг5М при а) 3500°C, б) 500°C

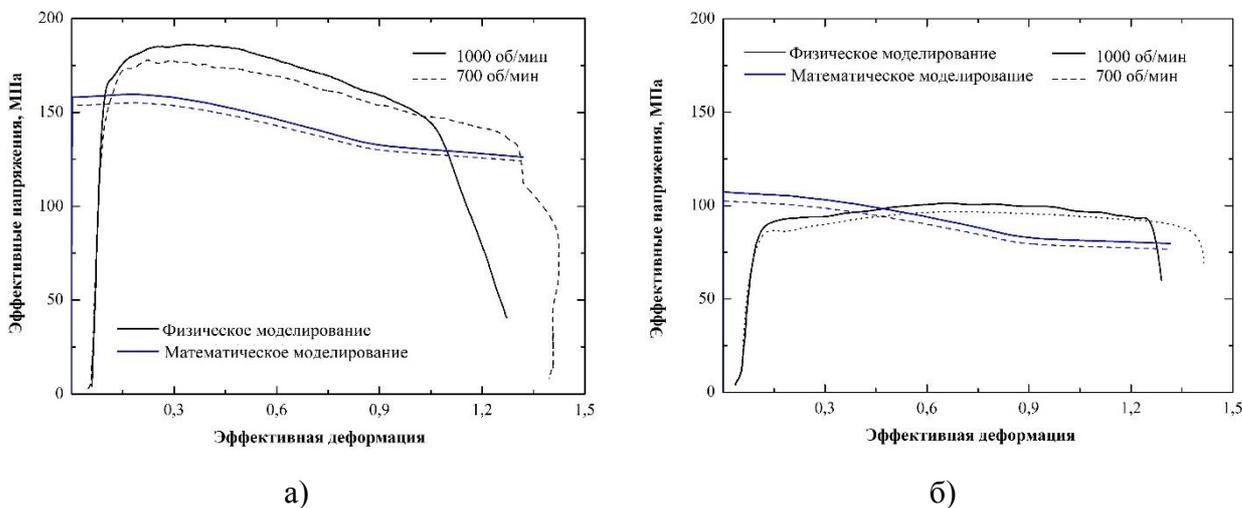


Рис. 49. Кривые эффективное напряжение - эффективная деформация при кручении сплава Д16АТ при а) 350°C, б) 500°C

А как и ожидалось, сплав А5Н имеет самый низкий уровень напряжений по сравнению с другими сплавами, сплав АМг5М имеет самый высокий уровень напряжений. Показано, что при температуре 500 ° С уровень напряжений практически не меняется на протяжении всего процесса деформации и для всех сплавов меньше уровня напряжений при температуре 350°C. В то время как при температуре 350 ° С сплавы АМг5М и Д16АТ О имеют значительное снижение уровня напряжений после достижения определенного значения деформации около 0,4. Для АМг5М разница между максимальным уровнем напряжения и минимальным уровнем напряжений составляет около 50 МПа, для сплава Д16Ат - около 40 МПа. Аналогичные

значения были получены при численном моделировании. Релаксация напряжений может быть связана с процессами динамической рекристаллизации или возврата. Для всех проведенных испытаний максимальные значения напряжений были получены при $T = 350^\circ \text{C}$, скорости вращения - 1000 об/мин.

Полученные результаты показывают, что характер кривых, полученных после математического и физического моделирования, совпадает, но полученные значения напряжений отличаются.

Выводы

В результате этой работы было выполнено физическое моделирование 24 образцов трех различных сплавов на основе алюминия с разными параметрами - температура, степень деформации и скорость деформации. Для каждого образца экспериментального плана было проведено математическое моделирование испытаний на высокоскоростное кручение при повышенных температурах.

Результаты численного моделирования хорошо согласуются с результатами физического моделирования.

Дальнейшие исследования будут направлены на установление взаимосвязи между микроструктурой и термомодеформационными параметрами при испытаниях на высокоскоростное кручение при повышенных температурах и применимости полученных данных для описания термомодеформационных параметров, возникающих при СТП.

Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы (диссертации)

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК

Physical and numerical simulation of friction stir welding for Al-based alloys, Anton Naumov, Hannes Wenzel, Anatolii Borisov, Anastasiya Doroshchenkova, Materials Science and Technology Conference and Exhibition 2019, MS and T 2019, 2019, с. 996-1001

Numerical simulation of hot high strain rate torsion tests for Al-based alloys, Anton Naumov, Anatolii Borisov, Anastasiya Doroshchenkova, Key Engineering Materials, 2019, vol. 822, pp 66-71

Влияние интенсивной пластической деформации на формирование микроструктуры сплавов цветных металлов, А.С. Борисов, А.А. Наумов, А.Ю. Борисова, О.Г. Зотов, В.Н. Цеменко, Технология металлов, №10 (принята в печать)

Аспирант _____



Борисов А.С.

(подпись)