



# РЕАКЦИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ДЛИТЕЛЬНУЮ ВЫДЕРЖКУ В УПРУГО-НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

Гуляев В.П.<sup>а</sup>; Петров, П.П.<sup>б</sup>; Степанова К.В.<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова,  
<sup>б</sup> Институт физико-технических проблем Севера СО РАН имени В.П. Ларионова



## Аннотация

В работе методом рентгеновской дифрактометрии изучено сопротивление кристаллической решетки стали 08пс, алюминия марки АД1 и меди марки М1 длительному действию (9 лет) упругих напряжений при разных уровнях статических нагрузок. Установлено, что годовой перепад температур внешней среды от -50°C зимой до +35°C температур в период с 2013 года по 2022 год не вызывает существенных изменений характеристик профилей дифракционных линий исследованных материалов. Характеристики профилей дифракционных линий, полученные в зимний период наблюдений, свидетельствуют о некотором снижении инструментальных погрешностей, обусловленных конструктивными условиями эксперимента.

Обнаружено систематическое изменение сопротивления кристаллической решетки исследованных материалов действию упругих напряжений при значениях  $\sigma > 0,5 \sigma_r$ . Выявленная ступенчатость процесса протекания элементарных актов реакции в локальной области отражения рентгеновского излучения, экспериментально обосновывает значение минимального коэффициента запаса прочности материалов, принимаемого в расчетах конструкций на прочность

## Введение

Острая необходимость совершенствования регламентов эксплуатации и диагностирования различных технических систем обусловлена расширением хозяйственной деятельности предприятий и организаций в арктических и субарктических регионах страны с длительным периодом действия низких климатических температур. Требуемая надежность силовых элементов машин и конструкций определяется их рациональной металлоемкостью. При расчетах на прочность деталей машин и конструкций минимально возможное значение коэффициента запаса прочности должно устанавливаться путем экспериментального и теоретического изучения предельных границ потенциальных служебных свойств конструкционных материалов. Общеизвестна высокая эффективность рентгеновской дифрактометрии для выявления особенностей деформации кристаллической решетки конструкционных материалов в поле упругого напряженно-деформированного состояния. Вместе с тем, вопросы, связанные с использованием характеристик дифракционного профиля рентгеновских линий для диагностирования несущей способности материалов недостаточно изучены, в частности, не установлено особенности влияния климатических условий эксплуатации материалов на структурные и субструктурные изменения в кристаллических решетках металлов, нагруженных эксплуатационными напряжениями.

**Цель исследования.** Главной целью работы является экспериментальное исследование реакции кристаллической решетки конструкционных материалов с ОЦК и ГЦК решеткой при длительном действии напряжений, не превышающих условного предела текучести  $\sigma_{0,2}$ .

## Методика

Для исследования были выбраны следующие материалы: сталь 08пс, алюминий АД1, медь М1. Упруго-напряженное состояние создавалось в «сборках» по 3 последовательно соединенных между собой в единую цепь плоских образцов (рабочая часть 50x4,5x1) одного материала вертикально растягивающей статической нагрузкой. По программе исследования было собрано по две партии «сборки» образцов стали 08пс, образцов алюминия АД1 и образцов меди М1. Первая партия (4 «сборки» одного материала, всего 12 «сборок») выставлена на длительную статическую выдержку на открытой климатической площадке (г. Якутск), вторая (также 12 «сборок») – в помещении с нормальными условиями. В рабочей части образцов одной «сборки» под действием груза возникало постоянное напряжение растяжения равное  $\sigma = 0,9 \sigma_{0,2}$ . В рабочей части образцов второй «сборки»  $\sigma = 0,7 \sigma_{0,2}$ , третьей «сборки»  $\sigma = 0,5 \sigma_{0,2}$ , четвертой «сборки»  $\sigma = 0,3 \sigma_{0,2}$ .

Профили дифракционных линий от поликристаллической структуры исследуемых образцов определялись рентгеновским дифрактометром Rigaku Ultima IV с высокоточным горизонтальным гониометром при рабочем режиме рентгеновской трубки дифрактометра: напряжение  $U = 40$  кВ; ток  $I = 40$  мА. Профили аппроксимируются функцией псевдо-Войта в координатах  $\langle d - 2\theta \rangle$ , протокол измерений выдается таблицей числовых значений угла  $2\theta$  (в градусах) пика профиля, межплоскостного расстояния  $d$  (в ангстремах), максимума интенсивности  $I_{max}$  отраженного излучения (в имп/с), полуширины профиля  $FWHM$  (в градусах).

## Результаты и обсуждение

Таблица 1. Значения  $FWHM$  ОЦК решетки стали 08 пс

Условия выдерживания под статической нагрузкой	Уровень действующих напряжений растяжения					
	$\sigma = 0$	$\sigma = 0,3 \sigma_{0,2}$	$\sigma = 0,5 \sigma_{0,2}$	$\sigma = 0,7 \sigma_{0,2}$	$\sigma = 0,9 \sigma_{0,2}$	
2013	Исходное состояние	0,235	-	-	-	-
	Нормальные условия	-	-	0,172	-	0,405
	Климатическая площадка	-	-	0,192	-	0,331
2015 лето	Нормальные условия	-	0,228	0,254	0,266	0,346
	Климатическая площадка	-	0,162	0,323	0,188	0,262
	Нормальные условия	-	0,149	0,256	0,288	0,318
2015 зима	Климатическая площадка	-	0,154	0,314	0,265	0,239
	...	...	...	...	...	...
2021 зима	Нормальные условия	-	0,310	0,345	0,420	0,376
	Климатическая площадка	-	0,185	0,269	0,337	0,285

Таблица 2. Значения  $FWHM$  ГЦК решетки алюминия АД1

Условия выдерживания под статической нагрузкой	Уровень действующих напряжений растяжения					
	$\sigma = 0$	$\sigma = 0,3 \sigma_{0,2}$	$\sigma = 0,5 \sigma_{0,2}$	$\sigma = 0,7 \sigma_{0,2}$	$\sigma = 0,9 \sigma_{0,2}$	
2013	Исходное состояние	0,36	-	-	-	-
	Нормальные условия	-	-	0,391	-	0,34
	Климатическая площадка	-	-	0,41	-	0,397
2015 лето	Нормальные условия	-	0,464	0,369	0,455	0,371
	Климатическая площадка	-	0,444	0,369	0,563	0,534
2015 зима	Нормальные условия	-	0,473	0,366	0,486	0,386
	Климатическая площадка	-	0,490	0,383	0,570	0,498
...	...	...	...	...	...	
2021 зима	Нормальные условия	-	0,498	0,363	0,493	0,359
	Климатическая площадка	-	0,495	0,356	0,678	0,450

Таблица 3. Значения  $FWHM$  ГЦК решетки меди М1

Условия выдерживания под статической нагрузкой	Уровень действующих напряжений растяжения					
	$\sigma = 0$	$\sigma = 0,3 \sigma_{0,2}$	$\sigma = 0,5 \sigma_{0,2}$	$\sigma = 0,7 \sigma_{0,2}$	$\sigma = 0,9 \sigma_{0,2}$	
2013	Исходное состояние	0,152	-	-	-	-
	Нормальные условия	-	-	0,135	-	0,298
	Климатическая площадка	-	-	0,161	-	0,318
2015 лето	Нормальные условия	-	0,177	0,173	0,176	0,220
	Климатическая площадка	-	0,194	0,254	0,265	0,200
2015 зима	Нормальные условия	-	0,178	0,153	0,176	0,286
	Климатическая площадка	-	0,194	0,221	0,198	0,289
...	...	...	...	...	...	
2021 зима	Нормальные условия	-	0,179	0,172	0,219	0,242
	Климатическая площадка	-	0,204	0,213	0,236	0,262

## Контакты

Гуляев В.П.

[uekztddg@mail.ru](mailto:uekztddg@mail.ru)

Тел.: +79142744859

Уширения профилей дифракционных линий ( $FWHM$ ), отраженных от системы кристаллографических плоскостей второго порядка свидетельствуют, что реакция системы плоскостей при разных уровнях упруго-напряженно-деформированного состояния в диапазоне эксплуатационных напряжений от  $\sigma = 0$  до  $\sigma = 0,9 \sigma_{0,2}$  не линейна. Наблюдается существенное изменение  $FWHM$  профиля дифракционной линии в интервале действующих напряжений от  $\sigma = 0$  до  $\sigma = 0,3 \sigma_{0,2}$ . По мере роста уровня напряжений до  $\sigma = 0,9 \sigma_{0,2}$  реакция сопротивления субструктуры твердого раствора не нарастает и остается достаточно стабильной.

Периодическое волнообразное изменение средних значений  $FWHM$  образцов, обнаруженное рентгеновскими съемками на протяжении ряда лет, возможно является экспериментальным подтверждением диссипации упругой энергии по объему нагружаемых тел. Процессы диссипации упругой энергии различными атомными и субструктурными механизмами сохраняют уравновешенное макроскопическое состояние ОЦК и ГЦК структуры твердого раствора вне зависимости от длительности действия статического нагружения.

Полученные результаты согласуются с теоретическими представлениями о возбуждении искажениями кристаллической решетки пространственно локализованных колебательных мод – дискретных бризеров и фононных спектров, способствующих перестройке субструктуры неравновесных кристаллов. Влияние внешнего механического воздействия на изменения субструктуры в поверхностных слоях установлено также методами рентгеновской и нейтронной дифрактометрии.

## Заключение

Применение метода рентгеновской дифрактометрии сложных поликристаллических металлических материалов с ОЦК и ГЦК решетками обладает достаточной разрешающей способностью выявления изменений тонкой структуры при упруго-напряженном состоянии образцов. Уширение профиля дифракционной линии ( $FWHM$ ) характеризует влияние упруго-напряженного состояния на протекание процессов реакции кристаллической решетки в поверхностных слоях образцов стали 08 пс, алюминия АД1 и меди М1.

Экспериментальное исследование влияния длительности действия малых упругих напряжений показывает, что периодическое годовое колебание температур от -50°C до +37°C не отражается существенным изменением характеристик профиля дифракционных линий образцов материалов с ОЦК и ГЦК решетками. Напротив, низкие климатические температуры способствуют устранению отдельных инструментальных погрешностей, обусловленных конструктивными условиями эксперимента. Резкое изменение значений  $FWHM$  профиля дифракционных линий при напряжениях  $\sigma > 0,5 \sigma_{0,2}$  указывает, возможно, на минимальное значение коэффициента запаса прочности исследованных конструкционных материалов.

## Литература

- С.Л. Костюченко. Стратегия освоения минеральных ресурсов Российской Арктики // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2017. - №1. С. 3-12.
- V.P. Gulyaev, P.P. Petrov, K.V. Stepanova. Diagnostics of critical states of constructions operated under low temperature conditions // Polar Mechanics 2018. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. - V. 193. – 2018. doi: 10.1088/1755-1315/193/1/012015.
- В.П. Гуляев, в М.М. Сибиряков, П.П. Петров, К.В. Степанова. Влияние формы включений графита в чугунах на искажения кристаллической решетки и трещиностойкость при моделировании эксплуатационных нагрузок на рабочие органы горных машин, работающих в условиях естественных низких температур // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. - 2018. - Т.24. - № 2. С. 58-65.
- Г.Д. Бокучава, И.В. Папушкин, В.В. Сумин, А.М. Балагуров, Д.В. Шептяков. Изучение микродеформации в дисперсионно-упрочненных сталях // Физика твердого тела. – 2014. - Т.56. - Вып. 1. - С. 165–169.
- Л.Р. Ботвина. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности // – М. Наука. 2008. – 334 с.
- Г.В. Клевцов, Н.А. Клевцова, О.А. Фролова. Кинетика мартенситных превращений в аустенитной стали при циклическом нагружении // Материалы конференций. Фундаментальные исследования. – 2006. - № 5. - С. 45.
- С.В. Дмитриев, Е.А. Корзникова, Ю.А. Баимова, М.Г. Веларде. Дискретные бризеры в кристаллах // Успехи физических наук. – 2016. – Том 186. - №5. 471-488. Doi.org/10.3367/UFN.2016.02.037729.
- Zhu T, Li J Prog. Mater. Sci. 55 710 (2010)
- Г.В. Клевцов, Н.А. Клевцова, О.А. Фролова. Кинетика мартенситных превращений в аустенитной стали при циклическом нагружении // Материалы конференций. Фундаментальные исследования. – 2006. - № 5. - С. 45.
- П.А. Ершов, С.М. Кузнецов, И.И. Снигирева, В.А. Юнкин, А.Ю. Гойхман, А.А. Снигирев. Высокоразрешающая рентгеновская дифрактометрия с применением одномерных и двумерных преломляющих линз // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2015. - № 6. С. 55–59.
- Е.М. Гринберг, А.А. Алексеев, С.Г. Шеверев. Изменение тонкой структуры при низкотемпературном распаде мартенсита закаленной среднеуглеродистой стали // Вопросы материаловедения. – 2016. - № 2(86). С. 20–25.