

Министерство образования и науки Российской Федерации  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

---

*А. И. Рудской Н. Р. Варгасов Б. К. Барахтин*

## ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ МЕТАЛЛОВ

Под редакцией доктора технических наук,  
профессора *Н. Р. Варгасова*

 **ИЗДАТЕЛЬСТВО**  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Санкт-Петербург  
2018

УДК 539.4:620.17

P83

Рецензенты:

Член-корреспондент РАН, доктор технических наук (ИФТТ РАН)

*М. И. Карпов*

Доктор физико-математических наук, профессор МИСиС *А. М. Глезер*

*Рудской А. И. Термопластическое деформирование металлов / А. И. Рудской, Н. Р. Варгасов, Б. К. Барахтин ; под ред. Н. Р. Варгасова. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2018. — 286 с.*

Изложена позиция авторов, согласно которой совершенствование технологии термопластической обработки материалов невозможно без применения современной научной методологии, основанной на фундаментальных знаниях физики, химии, материаловедения, математики и других дисциплин. Рассмотрены результаты экспериментов, имитирующих типовую технологическую операцию — горячее пластическое сжатие металла. Описана методика обработки диаграмм нагружения, позволяющая на основе реологической модели распределения вводимой механической энергии построить карты процесса для нахождения технических решений при разработке высокоэффективных и ресурсосберегающих технологий горячей обработки материалов.

Предназначена для научных работников, инженеров, аспирантов и студентов, занимающихся проблемами физики прочности и пластичности материалов и разработкой эффективных технологий термопластической обработки сталей и сплавов.

Табл. 22. Ил. 133. Библиогр: 255 назв.

© Рудской А. И., Варгасов Н. Р.,  
Барахтин Б. К., 2018

© Варгасов Н. Р., научное  
редактирование, 2018

ISBN 978-5-7422-6005-9

doi: 10.18720/SPBPU/2/id18-9

© Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого, 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . .	7
<b>Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ . . . . .</b>	<b>19</b>
1.1. Методы совершенствования технологических операций с использованием горячей пластической деформации . . . . .	19
1.2. Механизмы, ответственные за формирование структуры металла в условиях горячей пластической деформации . . . . .	31
1.2.1. Основные механизмы структурных изменений. . . . .	32
1.2.2. Структурные изменения с участием температурного фактора . . . . .	45
1.3. Роль фактора времени в формировании структурно- механического состояния деформируемого материала . . . . .	50
1.3.1. Дискретное и континуальное описание процесса деформации . . . . .	51
1.3.2. Структурно-аналитическая теория прочности . . . . .	53
1.3.3. Физическая мезомеханика . . . . .	55
1.3.4. Теория элементарного сдвига . . . . .	58
1.3.5. Фрактальная механика . . . . .	61
1.4. Кинетика структурных превращений в условиях пластической деформации . . . . .	71
1.4.1. Экспериментальные исследования в режиме реального времени с использованием синхротронного излучения . . . . .	72
1.4.2. Результаты рентгеноструктурного анализа с позиций нелинейной кинетики . . . . .	85
1.4.3. Механизмы и процессы структурных изменений. Электронно-микроскопические исследования . . . . .	89
1.5. Структурные переходы и самоорганизация дефектов кристаллического строения в статистически геометрических образах . . . . .	96
1.5.1. Термодинамический аспект проблемы . . . . .	98
1.5.2. Кинетический аспект проблемы. . . . .	100

1.5.3. Энергетика структурных переходов . . . . .	102
1.5.4. Состояние системы как способ передачи информации . . . . .	104
1.6. Анализ структурного состояния деформированных материалов по изображениям. . . . .	108
1.7. Выводы . . . . .	117
<b>Глава 2. ДИАГНОСТИКА МЕХАНИЧЕСКОГО И СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА В УСЛОВИЯХ ГОРЯЧЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ . . . . .</b>	<b>118</b>
2.1. Механические испытания — основная информационная база имитационного моделирования термопластической обработки . . . . .	118
2.2. Поведение твердых тел в условиях горячей пластической деформации с позиций реологии . . . . .	125
2.3. Критериальные оценки эффективности термопластической обработки и стабильности материала при горячей пластической деформации. . . . .	136
2.4. Алгоритм расчета структурно-энергетических критериев оптимизации . . . . .	141
2.5. Использование современных аналитических средств для фиксации структурных изменений . . . . .	146
2.5.1. Диагностика механического состояния материалов в модельных имитационных испытаниях. . . . .	147
2.5.2. Регистрация структурных изменений с помощью современных зондовых средств анализа . . . . .	153
2.6. Выводы . . . . .	158
<b>Глава 3. ПОВЕДЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ГОРЯЧЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ . . . . .</b>	<b>159</b>
3.1. Выбор материалов для экспериментов имитационного моделирования термопластической обработки . . . . .	160
3.1.1. Сплавы на основе железа и экономно легированные стали . . . . .	166
3.1.2. Сплавы с высоким содержанием азота . . . . .	177
3.1.3. Нержавеющие аустенитные стали типового химического состава . . . . .	180
3.1.4. Сплавы на основе алюминия — магнелии . . . . .	182
3.2. Термопластические испытания. . . . .	185
3.2.1. Имитационные эксперименты . . . . .	186
3.2.2. Структурные изменения в результате горячего сжатия. . . . .	208

3.2.3. Поведение деформируемых металлов в отображении карт процесса термопластической обработки . . . . .	222
3.3. Выводы . . . . .	229
<b>Глава 4. ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ПРИ ОЦЕНКЕ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛОВ. . . . .</b>	<b>230</b>
4.1. Нелинейность среды при горячем сжатии. . . . .	231
4.2. Обнаружение неустойчивости деформируемой среды по изображениям . . . . .	237
4.3. Информативность карт процесса термопластической обработки . . . . .	246
4.4. Эволюция структур в отображении карт процесса термопластической обработки . . . . .	249
4.5. Выводы . . . . .	262
Заключение . . . . .	264
Библиографический список . . . . .	267