

---

М О Н О Г Р А Ф И И      И Г Т У

---

ИССЛЕДОВАНИЕ  
КОНСТРУКТИВНОЙ  
ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ  
ПОСЛЕ КОМБИНИРОВАННОГО  
УПРОЧНЕНИЯ  
И СПЕЦИАЛЬНЫХ ВИДОВ  
СВАРКИ



**ИССЛЕДОВАНИЕ  
КОНСТРУКТИВНОЙ  
ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ  
ПОСЛЕ КОМБИНИРОВАННОГО  
УПРОЧНЕНИЯ  
И СПЕЦИАЛЬНЫХ ВИДОВ  
СВАРКИ**



**НОВОСИБИРСК  
2 0 1 5**

УДК 621.785.5+621.791.05  
И 889

Коллектив авторов:  
*А.В. Плохов, А.И. Попелюх,  
С.В. Веселов, А.Г. Тюрин, А.А. Никулина*

Рецензенты:  
д-р техн. наук *А.О. Токарев* (НГАВТ)  
канд. техн. наук *А.И. Смирнов* (НГТУ)

**И 889** **Исследование конструктивной прочности материалов после комбинированного упрочнения и специальных видов сварки : монография / А.В. Плохов, А.И. Попелюх, С.В. Веселов, А.Г. Тюрин, А.А. Никулина. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – 392 с. (Серия «Монографии НГТУ»).**

ISBN 978-5-7782-2635-7

Конструктивная прочность – это обобщенная характеристика, определяющая поведение конструкций и (или) материала в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным. Книга раскрывает проблемы конструктивной прочности и условно состоит из трех частей. В первой отражены вопросы объемного упрочнения (гл. 1, 2). Во второй части изложена сущность исследований композиций «основной металл–покрытие» (гл. 3, 4). Третья часть (гл. 5) посвящена исследованию конструктивной прочности сварных соединений.

Монография адресована широкому кругу специалистов, создающих и применяющих новые материалы. Книга также может быть полезна бакалаврам, студентам магистрам и аспирантам вузов машиностроительных специальностей.

УДК 621.785.5+621.791.05

ISBN 978-5-7782-2635-7

© Коллектив авторов, 2015  
© Новосибирский государственный  
технический университет, 2015

**RESEARCH INTO STRUCTURAL  
STRENGTH OF MATERIALS  
AFTER COMBINED HARDENING  
AND SPECIAL KINDS OF WELDING**



**NOVOSIBIRSK  
2 0 1 5**

UDC 621.785.5+621.791.05  
И 889

Composite authors:

*A.V. Plokhov, A.I. Popelyukh,  
S.V. Veselov, A.G. Tyurin, A.A. Nikulina*

Reviewers:

*A.O. Tokarev, D.Sc. (Eng.), NSAWT  
A.I. Šmirnov, PhD (Eng.), NSTU*

И 889 **Research into structural strength of materials after combined hardening and special kinds of welding** : monograph / A.V. Plokhov, A.I. Popelyukh, S.V. Veselov, A.G. Tyurin, A.A. Nikulina. – Novosibirsk: NSTU Publisher, 2015. – 392 pp. (NSTU Monographs series).

ISBN 978-5-7782-2635-7

Structural strength is a generalized characteristic determining the behavior of structures and/or materials under conditions maximally brought closer to operating conditions. The book raises various structural strength problems and consists of three parts. The first part covers issues of bulk strengthening (Chapters 1 and 2). The second part deals with the essence of studies of base metal – coating compositions (Chapters 3 and 4). The third part is devoted to the investigation of structural strength of welded joints (Chapter 5).

The monograph is intended for wide circles of specialists who create and use new materials. The book can also be of use to undergraduate, graduate and postgraduate students specializing in mechanical engineering.

UDC 621.785.5+621.791.05

ISBN 978-5-7782-2635-7

© Composite authors, 2015  
© Novosibirsk State Technical University, 2015

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	1
Библиографический список к введению .....	10
<b>Глава 1. Влияние технологии упрочнения на конструктивную прочность деталей машин, работающих в условиях сложного динамического нагружения .....</b>	<b>11</b>
1.1. Особенности эксплуатации и конструктивная прочность деталей ударных механизмов .....	11
1.2. Материалы и методы исследований .....	15
1.3. Влияние режимов термической обработки и структуры на сопротивление стали усталостному разрушению при ударно-импульсном нагружении .....	23
1.3.1. Влияние режимов термической обработки на показатели усталостной долговечности стали .....	23
1.3.2. Особенности зарождения и распространения трещин в стали при нагружении многократным динамическим сжатием .....	26
1.3.3. Особенности распространения трещин в сталях с различной структурой .....	42
1.3.4. Механизм роста усталостных трещин в условиях нагружения многократным динамическим сжатием .....	48
1.3.5. Влияние неметаллических включений на сопротивление сталей усталостному разрушению .....	54
1.4. Влияние внешней среды на показатели надежности деталей горных машин, работающих в условиях динамического сжатия .....	63
1.5. Перспективные способы повышения конструктивной прочности деталей ударных механизмов .....	74
1.5.1. Повышение конструктивной прочности применением изотермической закалки .....	74
1.5.2. Повышение надежности деталей ударных машин созданием в стали смешанной структуры .....	78

1.5.3. Рациональное применение различных методов повышения надежности деталей ударных машин термической обработкой.....	86
1.5.4. Влияние комбинированной термомеханической обработки стали с мартенситно-бейнитным превращением аустенита на долговечность и надежность деталей машин ударного действия.....	93
1.5.5. Опытно-промышленные исследования долговечности ударных машин .....	101
Общие выводы по разделу .....	101
Библиографический список к главе 1 .....	103
<b>Глава 2. Формирование оптимальных структур сталей при регулируемом термопластическом упрочнении (РТПУ).....</b>	<b>109</b>
2.1. Структурная сущность РТПУ .....	110
2.2. Структура и свойства стали 20 после РТПУ с диффузионным распадом аустенита со скоростью охлаждения 120 °С/с.....	113
2.3. Исследование закономерностей формирования структуры и механических свойств стали 20 после РТПУ при скорости охлаждения 15 °С/с .....	121
2.4. Влияние субструктуры в мелком рекристаллизованном зерне аустенита на параметры и механические свойства мартенсита.....	128
2.5. Определение вкладов различных дислокационных моделей упрочнения в предел текучести стали 20Х23Н18 после РТПУ .....	135
2.6. Макро-, мезо- и наноструктурные основы создания оптимальных структур углеродистых сталей при РТПУ .....	142
Библиографический список к главе 2 .....	146
<b>Глава 3. Исследование конструктивной прочности композиции «основной металл–покрытие» .....</b>	<b>149</b>
3.1. Структурные исследования.....	152
3.2. Изучение механических свойств покрытий.....	165
3.3. Исследование физических свойств покрытий.....	175
3.4. Определение прочности соединения покрытия с основным металлом.....	186
3.5. Исследование защитных свойств покрытий.....	199
3.6. Износостойкость покрытий и испытания на изнашивание .....	207
3.7. Усталостные испытания образцов с покрытиями .....	216



3.8. Исследование трещиностойкости.....	223
3.9. Структура и свойства металлических покрытий, нанесенных методом холодного газодинамического напыления (ХГН).....	229
3.10. Исследование общей коррозии металлических покрытий, нанесенных методом ХГН.....	237
3.11. Пористость и наноструктурные образования в покрытиях, нанесенных методом ХГН.....	243
Библиографический список к главе 3 .....	251
<b>Глава 4. Повышение конструктивной прочности композиции «твердосплавное покрытие–сталь» .....</b>	<b>257</b>
4.1. Материалы и методы экспериментальных исследований .....	258
4.2. Физико-химическая и термомеханическая совместимость компонентов вольфрамокобальтового покрытия и основного металла .....	260
4.3. Анализ методов повышения конструктивной прочности композиции «твердосплавное покрытие–сталь» .....	276
4.4. Особенности строения вольфрамокобальтовых покрытий, сформированных на стальных поверхностях при использовании промежуточных подслоев .....	301
Библиографический список к главе 4 .....	316
<b>Глава 5. Повышение конструктивной прочности специальных сварных соединений .....</b>	<b>321</b>
5.1. Материалы и методы экспериментальных исследований .....	324
5.2. Особенности хрупкого разрушения сварных соединений .....	327
5.3. Изучение структуры на различных масштабных уровнях и свойств сварных швов .....	334
5.4. Повышение надежности сварных соединений из разнородных материалов .....	343
5.5. Решение трехмерной задачи по оценке деформации, типов структур и напряжений при стыковой контактной сварке .....	361
5.6. Структура и свойства сварных швов после автоматической подводной сварки порошковой проволокой .....	370
Библиографический список к главе 5 .....	380



## CONTENTS

Introduction.....	7
References to the Introduction.....	10
<b>Chapter 1. An Impact of Hardening Technologies on Structural Strength of Machine Parts under Conditions of Complex Dynamic Loading.....</b>	<b>11</b>
1.1. Operation peculiarities and structural strength of percussion mechanism parts .....	11
1.2. Research methods and materials .....	15
1.3. Influence of the structure and heat treatment modes on steel fatigue failure resistance under impact-impulsive loading.....	23
1.3.1. An impact of heat treatment modes on the steel fatigue life ratios .....	23
1.3.2. Peculiarities of crack nucleation and propagation in steel under multiple dynamic compression loading .....	26
1.3.3. Peculiarities of crack propagation in various structure steels .....	42
1.3.4. A mechanism of fatigue crack growth under cyclic compression loading.....	48
1.3.5. An impact of nonmetallic inclusions on the fatigue failure resistance of steels.....	54
1.4. An impact of the environment on reliability indices of mining machinery parts under dynamic compression conditions.....	63
1.5. Prospective ways of increasing structural strength of percussion mechanism parts.....	74
1.5.1. Increasing structural strength by isothermal hardening .....	74
1.5.2. Increasing the reliability of percussion mechanism parts by creating a mixed structure in steel .....	78
1.5.3. An efficient use of various methods of increasing the reliability of percussion mechanism parts by heat treatment .....	86
1.5.4. An impact of combined thermomechanical treatment of steel with martensite-bainitic transformation of austenite on the durability and reliability of percussion mechanism parts.....	93



1.5.5. Experimental-industrial studies of percussion mechanism durability.....	101
General Conclusions .....	101
References to Chapter 1 .....	103
<b>Chapter 2. Formation of Optimal Steel Structures by Adjustable Thermoplastic Hardening (ATPH) .....</b>	<b>109</b>
2.1. The ATPH structural essence.....	110
2.2. The structure properties of steel 20 after ATPH with austenite diffusion decomposition at a cooling rate of 120° C/sec. ....	113
2.3. Study of regularities of forming the structure and mechanical properties of steel 20 after ATPH at a cooling rate of 15°C/sec.....	121
2.4. An impact of a substructure in a fine recrystallized grain of austenite on parameters and mechanical properties of martensite.....	128
2.5. Determination of contributions of various dislocation models of hardening to yield strength of steel 20X23H18 after ATPH .....	135
2.6. Macro-, meso- and nanostructural basics of creating optimal structures of carbon steels by ATPH.....	142
References to Chapter 2 .....	146
<b>Chapter 3. Studies of Structural Strength of the Base Metal-Coating Composition .....</b>	<b>149</b>
3.1. Structural studies.....	152
3.2. Study of mechanical properties of coatings .....	165
3.3. Study of physical properties of coatings .....	175
3.4. Determination of the base metal-coating bonding strength.....	186
3.5. Study of protective properties of coatings.....	199
3.6. Wear resistance of coatings and wear-out tests.....	207
3.7. Fatigue tests of coated samples .....	216
3.8. Study of crack growth resistance .....	223
3.9. The structure and properties of metal coatings deposited by the cold gas-dynamic spraying (CGDS) method .....	229
3.10. Study of general corrosion of metal coatings deposited by the CGDS method.....	237
3.11. Porosity and nanostructural formations in coatings deposited by the CGDS method.....	243
References to Chapter 3 .....	251



---

<b>Chapter 4. Enhancement of Structural Strength of the Hard-Alloy Coating - Steel Composition .....</b>	<b>257</b>
4.1. Methods and materials of experimental studies .....	258
4.2. Physico-chemical and thermomechanical compatibility of tungsten-cobalt coating - base metal components .....	260
4.3. The analysis of methods of structural strength enhancement of the hard-alloyed coating – steel composition .....	276
4.4. Peculiarities of the composition of tungsten-cobalt coatings formed on steel surfaces when using intermediate sublayers .....	301
References to Chapter 4 .....	316
<b>Chapter 5. Enhancement of Structural Strength of Special Welded Joints .....</b>	<b>321</b>
5.1. Methods and materials of experimental studies .....	324
5.2. Peculiarities of brittle failure of welded joints .....	327
5.3. The structure study at various scale levels and properties of welded joints.....	334
5.4. Enhancement of reliability of dissimilar material welded joints .....	343
5.5. Solution of a 3D problem while assessing deformation, structure types and stresses in butt-seam contact welding .....	361
5.6. The structure and properties of welded joints after automatic underwater welding with flux cored electrode .....	370
References to Chapter 5 .....	380