

УДК 621.74.042:669.187.56  
DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-5-10

Е. Н. ЕРЕМИН<sup>1</sup>  
Г. Н. МИННЕХАНОВ<sup>2</sup>  
Р. Г. МИННЕХАНОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Омский государственный  
технический университет,  
г. Омск

<sup>2</sup>ООО «Технологический центр»,  
г. Омск

## ПРИМЕНЕНИЕ ИНОКУЛИРУЮЩЕГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ ЛИТОГО МЕТАЛЛА ЗАГОТОВОК ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ К МЕЖКРИСТАЛЛИТНОЙ КОРРОЗИИ

Рассмотрена проблема повышения качества центробежных труб из нержавеющей сталей. Предложено для получения таких труб с повышенными механическими и служебными свойствами ввод ферротитана выполнять в печи под шлак после его глубокого раскисления добавкой, содержащей редкоземельные металлы. Перед выпуском расплава из печи расплав необходимо обработать нанодисперсным карбонитридом титана в составе модифицирующего брикета. Выполнение вышеперечисленных условий позволяет повысить предел прочности литого металла на 10–15 %, пластичности на 30–45 % при повышении стойкости к межкристаллитной коррозии по всему сечению отливки.

**Ключевые слова:** сталь 08X18H9T, трубная заготовка, центробежное литье, дисперсный инокулятор, нанодисперсные частицы, модифицированный металл, механические свойства отливок, межкристаллитная коррозия.

*Работа выполнена за счет гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект №16-48-550523).*

**Введение.** Потребность современной техники в полых, и в том числе трубных заготовках исключительно велика. Так, трубные заготовки из нержавеющей сталей находят широкое применение в устройствах химико-термической обработки изделий. К материалу труб предъявляются повышенные требования по механическим и служебным свойствам, особенно по стойкости к межкристаллитной коррозии (МКК), определяющей ресурс работы изделия.

Поэтому в качестве материала для таких труб широкое применение нашла нержавеющая сталь

08X18H9T [1, 2]. Подобные трубы изготавливаются открытой индукционной плавкой с центробежным литьем на установках с горизонтальной осью вращения [3]. Металл после раскисления выпускается в промежуточный ковш. Существующие методы повышения стойкости к МКК за счет дополнительного легирования никелем, молибденом приводят к повышению себестоимости литых заготовок и снижению их конкурентоспособности. В то же время легирование титаном с концентрацией в пределах пяти-, семикратной концентрации углерода в расплаве и последующая закалка отливок в воду

обеспечивает существенное повышение стойкости к МКК [4]. Поэтому в процессе центробежного литья на дно ковша или в струю при выпуске расплава подается титаносодержащая добавка. Из ковша расплав через промворонку сливается во вращающуюся литейную форму-изложницу, покрытую изнутри теплоизоляционным и противопригарным слоем. Однако при заливке, вследствие вторичного окисления металла, имеет место угар легирующих элементов. Вследствие этого в литом металле не сохраняется заданный химический состав исходного сплава. Поэтому полного усвоения титана, определяющего основные свойства сплава, не происходит. Кроме того, литой металл имеет столбчатую крупнозернистую структуру с большей протяженностью первичных осей дендритов. При изготовлении отливок методами центробежного литья также усиливается ликвация титана, что приводит к его неравномерному распределению по телу отливки [5]. Нерациональные режимы ввода титана в расплав обуславливают формирование в структуре отливок зон, обогащенных титаном. Поскольку концентрация титана в разных сечениях отливки различна, эти зоны существенно отличаются и коррозионной стойкостью.

Все эти факторы снижают стойкость литого металла к МКК и не обеспечивают в полной мере требуемые служебные характеристики отливок. Поэтому совершенствование технологии центробежного литья нержавеющей сталей является актуальной задачей. Перспективным методом повышения коррозионной стойкости литого металла является его объемное модифицирование дисперсными иноккуляторами. В качестве иноккуляторов широкое распространение нашли частицы карбонитрида титана [6–9]. Однако его влияние на коррозионную стойкость нержавеющей сталей не изучено. В связи с этим в работе исследовали технологические особенности модифицирования литого металла частицами карбонитрида титана и его влияние на механические свойства и коррозионную стойкость полученных отливок.

**Объекты и методы исследований.** Объектом исследований является нержавеющая сталь 08X18H9ТЛ, полученная индукционной плавкой с центробежным литьем на установке с горизонтальной осью вращения.

Химический состав литого металла и распределение титана по сечению трубной отливки определяли методом спектрального анализа на установке ДФС-500.

Испытания на стойкость к МКК проводили по методу АМУФ согласно ГОСТу 6032-2003. Для каждой отливки исследовали образцы, вырезанные с наружной и внутренней поверхности.

Металлографические исследования литого металла проводили на оптическом микроскопе Olympus GX-41.

Механические испытания проводили на универсальной разрывной машине УММ-10. Ударную вязкость образцов определяли на маятниковом копре КН-30.

Для изучения механических, служебных свойств и структуры отливок вырезали кольца.

**Результаты и обсуждение.** Плавка, транспортировка жидкой стали и формирование отливки происходит в окислительной среде, что приводит к образованию в структуре соединений титана в виде оксидов, оксикарбидов, оксинитридов, оксикарбонитридов, карбидов, нитридов, обладающих

существенно низкой плотностью по сравнению с расплавами. Для неметаллических включений размером менее 0,1 мкм центробежные силы не оказывают существенного влияния на их распределение в структуре отливок. Более крупные включения вытесняются к центру тела вращения.

Интенсивность перемещения соединений титана зависит от скорости кристаллизации отливки, определяемой ее параметрами, теплофизическими характеристиками литейной формы, температурой заливаемого металла, скоростью заполнения литейной формы.

Окисление и угар легирующих элементов при центробежном литье труб из расплава индукционной плавки обусловлены протеканием следующих процессов:

- расплавлением и перегревом металла в индукционной печи;
- выпуском расплава из печи в ковш;
- транспортировкой ковша до стенда разлива;
- выпуском металла из ковша и заполнением литейной формы;
- кристаллизацией металла в литейной форме.

Окисление, угар элементов и насыщение металла газами из окружающей среды во время плавки и перегрева расплава устранены ведением процесса под покровным шлаком и применением чистых шихтовых материалов. Снижение концентрации кислорода при выпуске расплава, достигнуто раскислением его лигатурой, содержащей редкоземельные металлы.

Уменьшение угара элементов расплава во время транспортировки обеспечивается наведением покровного шлака над зеркалом металла в ковше.

Основная доля угара элементов и окисление металла происходит при выпуске металла из ковша и заполнении литейной формы. За счет вращения изложницы и потока заливаемого в нее металла постоянно вовлекается свежая порция воздуха. Расплав, попадающий из промворонки в литейную форму, имеет более высокую температуру, чем расплав в изложнице, и, соответственно, имеет меньшую плотность, что способствует формированию внутренней поверхности трубы свежим расплавом, подвергающимся окислению. При остывании расплава и его кристаллизации внутренняя поверхность отливки продолжает контактировать с окислительной средой. Наведение шлака из смеси вермикулита и перлита на внутренней поверхности трубы улучшает направленность кристаллизации и уменьшает окисление расплава во время его кристаллизации.

Для уменьшения контакта с расплавом в литейной форме перед выпуском расплава в промворонку, изложницу заполняли аргоном. Во время заполнения формы продувка аргоном продолжалась. Объем газа, расход и давление аргона определялись опытным путем.

Для повышения качества отливок центробежных труб из нержавеющей сталей металл после плавки и его перегрева в индукционной печи с основной футеровкой предложено перед вводом ферротитана дополнительно раскислять лигатурой, содержащей редкоземельные металлы (РЗМ). После ввода титана перед выпуском расплава из печи его обрабатывали нанодисперсным порошком карбонитрида титана в составе модифицирующего брикета [6]. Далее расплав выпускали в ковш, а из ковша через промворонку происходило заполнение литейной формы. После выливки отливки термообрабо-

Химический состав стали исходной и опытных плавок

| № плавки    | Химический состав, в % |      |      |      |      |      |      |      |       |       |
|-------------|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
|             | C                      | Mn   | Si   | Cr   | Ni   | Mo   | Ti   | Cu   | S     | P     |
| Исходная    | 0,07                   | 1,36 | 0,64 | 17,2 | 9,35 | 0,16 | 0,63 | 0,19 | 0,016 | 0,025 |
| Опытная № 1 | 0,07                   | 1,53 | 0,59 | 17,1 | 9,34 | 0,17 | 0,65 | 0,17 | 0,017 | 0,024 |
| Опытная № 2 | 0,07                   | 1,42 | 0,61 | 17,0 | 9,50 | 0,15 | 0,63 | 0,15 | 0,016 | 0,024 |

тали при температуре 1050–1100 °С и охлаждали на воздухе.

Химический состав отливок приведен в табл. 1.

Пошаговый спектральный анализ показал, что в исходных центробежнолитых отливках из стали 08X18H9ТЛ наблюдается повышенная ликвация титана. Причем в зависимости от способа введения ферротитана в расплав разница в концентрации титана достигает 0,4–0,7 %. Так, ввод ферротитана в ковш при выпуске расплава из печи приводит к образованию островков с высокой концентрацией титана. Данные островки в основном находятся ближе к центру вращения отливки (рис. 1).

При вводе ферротитана в печи под шлак наблюдается прирост концентрации титана во внутренней зоне трубы, который составляет 0,15–0,2 % (рис. 2). В структуре отливок «островков» с повышенным содержанием титана не наблюдается, что показывает равномерное распределение и усвоение титана при вводе измельченного ферротитана под шлак в печи.

Для отливок из расплавов, подвергнутых модифицированию нанодисперсными частицами карбонитрида титана, получено более равномерное распределение титана по сечению труб (рис. 3).

При этом имеет место незначительное снижение концентрации титана от периферии к центру отливки. Полученный результат может быть объяснен эффектом модифицирования карбонитридом титана и снижением вторичного окисления расплава благодаря вводу специального покровного флюса на поверхность расплава в ковше. Инокулирующее модифицирование карбонитридом титана приводит к формированию еще в расплаве мельчайших включений из оксикарбонитридов, трудно удаляемых центробежными силами и фронтом кристаллизации [6].

Перераспределение азота, кислорода, титана между матрицей сплава и центрами кристаллизации для карбонитридов, оксикарбонитридов титана препятствует образованию крупных неметаллических включений и островков из зон обогащенных титаном.

Выравнивание концентрации титана по сечению отливки показывает инокулирующее действие комплекса, состоящего из нанодисперсного карбонитрида титана на матрицу сплава. При этом упорядочивание структуры в микрообластях в процессе кристаллизации матрицы происходит при более высоких температурах.

Анализ макроструктуры образцов, вырезанных из труб, показал, что модифицирование привело к значительному увеличению равноосной мелкозернистой зоны со стороны изложницы и внутренней поверхности трубы. Вместе с этим наблюдает-

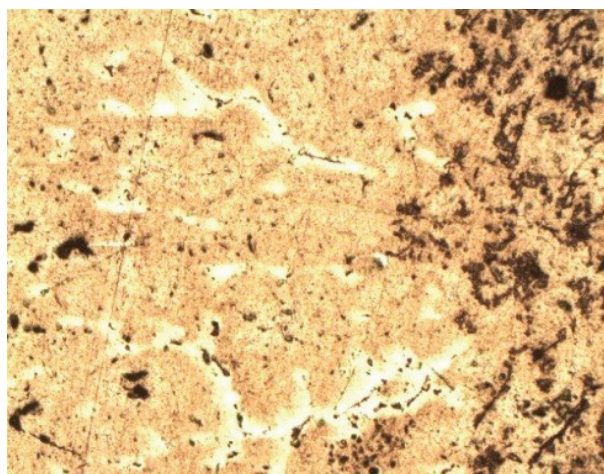


Рис. 1. «Островки» оксикарбонитрида титана в матрице стали 08X18H9ТЛ ( $\times 200$ )

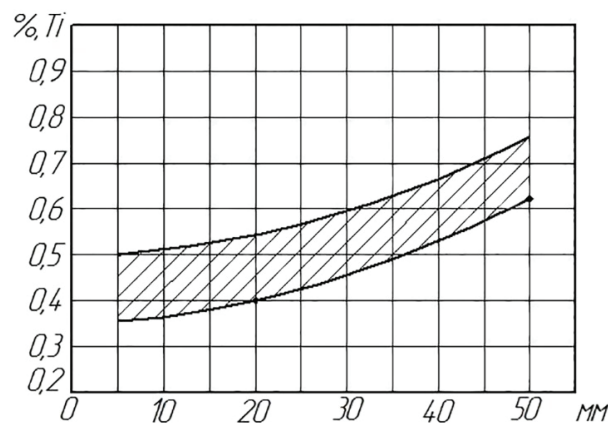


Рис. 2. Изменение концентрации титана по сечению отливки исходной плавки, 0 — со стороны изложницы

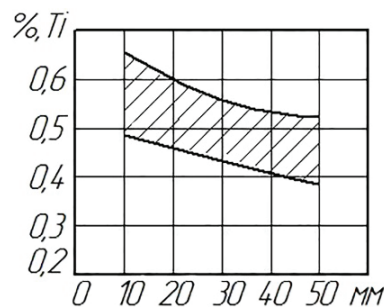


Рис. 3. Изменение концентрации титана по сечению отливки опытной плавки, 0 — со стороны изложницы



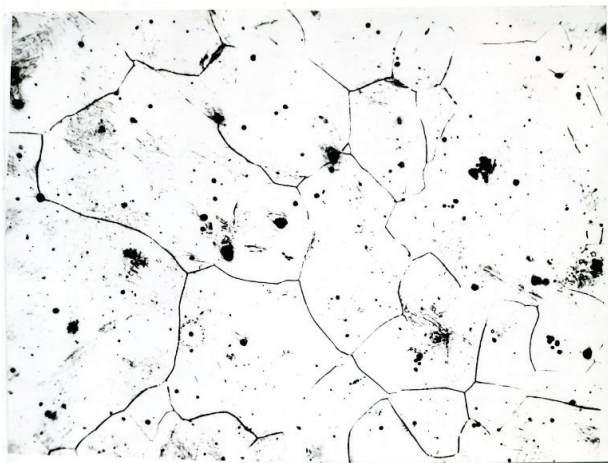


Рис. 4. Границы микрозерен в металле исходной трубы (×200)

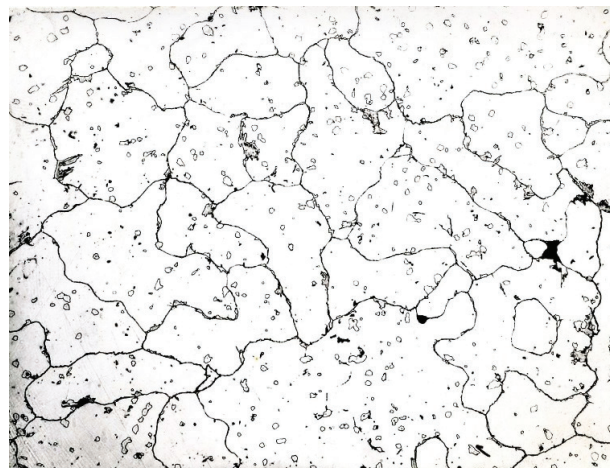


Рис. 5. Границы микрозерен в металле опытной трубы (×200)

Таблица 2

Механические свойства отливок

| № плавки    | Механические свойства |                       |                            |
|-------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|
|             | Предел прочности, МПа | Предел текучести, МПа | Относительное удлинение, % |
| ГОСТ 977-88 | 441                   | 177                   | 25                         |
| Исходная    | 480                   | 230                   | 50                         |
| Опытная № 1 | 556                   | 261                   | 70                         |
| Опытная № 2 | 568                   | 275                   | 78                         |

ся уменьшение поперечного сечения макрозерен в 1,5–2 раза. При этом доля равноосного зерна превышает более 50 % макроструктуры сечения отливки. Макроструктура образцов со стороны заливочного и незаливочного конца трубы отличается незначительно.

Для исходной трубы, отлитой по штатной технологии, характерно наличие трещин, рыхлот до глубины 15 мм с внутренней поверхности. Микроструктура исходной трубы имеет неблагоприятную морфологию и топографию. Границы микрозерен обогащены выделением грубых неметаллических включений (рис. 4). Доля границ чистых от неметаллических включений незначительна. Наблюдается наличие до 5 % феррита, расположенного в осях дендритов.

Для труб из модифицированного и расплава раскисленного лигатурой с РЗМ характерна плотная структура без видимых рыхлот и трещин.

На срезах труб островков обогащенных титаном не наблюдаются, что показывает равномерность распределения титана в матрице стали, которая наглядно выявляется при проведении микроспектрального анализа.

Анализ микроструктуры образцов труб из модифицированной стали показал более благоприятную морфологию и топографию избыточных фаз, в том числе на границах микрозерен. Карбонитриды титана имеют компактную форму и равномерно распределены в матрице отливки. При этом их размер в 2–3 раза мельче, чем в немодифицированном металле (рис. 5).

Для структуры всех образцов из модифицированного сплава характерно мелкое микрозерно и присутствие небольшого количества (до 2 %)  $\delta$ -феррита, равномерно распределенного по полю шлифа. Известно, что наличие такого количества  $\delta$ -феррита не оказывает отрицательного влияния на свойства литого металла [10, 11]. Морфология неметаллических включений в исследуемом литом металле соответствует металлу из проката. Карбиды титана сформировались в глобулярной форме, а карбонитриды имеют кубическую форму. Неметаллические включения имеют также глобулярную форму.

Результаты испытаний механических свойств отливок приведены в табл. 2. Из таблицы видно, что наиболее высокие свойства получены при комплексном подходе к процессу подготовки расплава, раскисления его РЗМ, ввода измельченного ферротитана в печи под шлак и модифицирования расплава нанодисперсными частицами карбонитрида титана.

Испытания на межкристаллитную коррозию показали, что образцы, вырезанные из наружной и внутренней поверхности модифицированного металла труб, имеют высокую стойкость (табл. 3).

Полученные результаты можно объяснить тем, что важными факторами, определяющими механические и коррозионные свойства легированных сплавов, являются состояние границ зерен их величина, степень однородности, морфология и топография включений [12–14]. В модифицированных отливках нанодисперсные частицы карбонитрида

## Коррозионные свойства отливок

| № плавки    | Стойкость к МКК       |                        |
|-------------|-----------------------|------------------------|
|             | Наружная поверхность  | Внутренняя поверхность |
| Исходная    | Не выдержал — трещины | Не выдержал — трещины  |
| Опытная № 1 | Выдержал              | Выдержал               |
| Опытная № 2 | Выдержал              | Выдержал               |

титана способствуют формированию вокруг них карбидов титана, за счет диффузии углерода и титана из микрообластей расплава. При этом кристаллизация карбидов происходит при более высоких температурах, что создает условия к их формированию в глобулярной форме и распределению частиц на осях дендритов [15]. Перераспределение углерода между карбидами и матрицей расплава приводит к повышению концентрации хрома в приграничных областях. Существенное измельчение микрочастиц обеспечивает увеличение протяженности границ между зернами, что приводит к снижению удельной доли вредных примесей на единице длины границы микрочастицы и ухудшает условия протекания коррозионных процессов [16].

Таким образом, очистка границ от неметаллических включений и вредных примесей, снижение ликвации легирующих элементов, повышение концентрации хрома в приграничных зонах гарантирует повышенную стойкость отливок из стали 08X18H9T к межкристаллитной коррозии.

**Заключение.** По ходу проведения плавки, выпуска металла из печи и заполнения литейной формы необходимо обеспечивать условия, позволяющие исключить вторичное окисление расплава.

Для получения центробежнолитых труб из нержавеющей сталей аустенитного класса с повышенными механическими и служебными свойствами ввод ферротитана необходимо выполнить в печи, под шлак, после его глубокого раскисления добавкой, содержащей редкоземельные металлы.

Перед выпуском расплава из печи необходимо обработать расплав нанодисперсными частицами карбонитрида титана в составе модифицирующего брикета.

Выполнение вышеперечисленных условий позволяет повысить предел прочности литого металла на 10–15 %, пластичности на 30–45 % при повышении стойкости к межкристаллитной коррозии по всему сечению отливки.

## Библиографический список

1. Шлямнев А. П., Свистунова Т. В., Сорокина Н. А. [и др.]. Коррозионностойкие, жаростойкие и высокопрочные стали и сплавы: справочник. М.: Проммет-сплав, 2008. 332 с. ISBN 978-5-9901182-1-8.
2. Остапенко Л. Н., Тигельман С. М., Крнейнинг Е. В. [и др.]. Применение тупиковых радиационных труб в агрегатах для химико-термической обработки // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1980. № 1. С. 30–32.
3. Юдин С. Б., Левин М. М., Розенфельд С. Е. Центробежное литье. М.: Металлургия, 1972. 280 с.
4. Томашов Н. Д., Чернова Г. П. Теория коррозии и коррозионностойкие конструкционные сплавы. М.: Металлургия, 1986. 359 с.

5. Патон Б. Е., Медовар Б. И. Электрошлаковый металл. Киев: Наукова Думка, 1981. 677 с.

6. Сабуров В. П., Еремин Е. Н., Черепанов А. Н. [и др.]. Модифицирование сталей и сплавов дисперсными инокуляторами. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2002. 212 с.

7. Артемьев А. А., Соколов Г. Н., Лысак В. И. Влияние микрочастиц диборида титана и наночастиц карбонитрида титана на структуру и свойства наплавленного металла // *Металловедение и термическая обработка материалов*. 2011. № 12. С. 32–37.

8. Предтеченский М. Р. Плазмохимический синтез нанопорошков тугоплавких соединений и их применение для модифицирования конструкционных сталей и сплавов // *Литейщик России*. 2010. № 3. С. 28–29.

9. Полубояров В. А., Коротаева З. А., Черепанов А. Н. [и др.]. Применение механически активированных ультрадисперсных керамических порошков для улучшения свойств металлов и сплавов // *Наука производству*. 2002. № 2. С. 2–8.

10. Carrouge D., Bhadeshia H. K. D. H., Woollin P. Effect of  $\delta$ -ferrite on impact properties of supermartensitic stainless steel heat affected zones // *Science and Technology of Welding and Joining*. 2004. Vol. 9, Issue 5. P. 377–389. DOI: 10.1179/136217104225021823.

11. Schäfer L. Influence of delta ferrite and dendritic carbides on the impact and tensile properties of a martensitic chromium steel // *Journal of Nuclear Materials*. 1998. Vol. 258-263, Part 2. P. 1336–1339. DOI: 10.1016/S0022-3115(98)00200-1.

12. Логунов А. В., Петрушин П. В., Кукшова Е. А. [и др.]. Прогнозирование влияния структурных факторов на механические свойства жаропрочных сплавов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1981. № 6. С. 16–20.

13. Еремин Е. Н., Лосев А. С., Филиппов Ю. О. [и др.]. Влияние инокулирующего модифицирования на морфологию и топографию упрочняющих фаз в жаропрочном сплаве // *Литейщик России*. 2008. № 8. С. 39–43.

14. Hashemi B., Rezaee Yazdi M., Azar V. The wear and corrosion resistance of shot peened-nitrided 316L austenitic stainless steel // *Materials and Design*. 2011. No. 32. P. 3287–3292.

15. Филиппов Ю. О., Еремин Е. Н., Лосев А. С. [и др.]. Структура и свойства высокохромистых сталей, модифицированных тугоплавкими частицами // *Омский научный вестник*. 2007. № 2 (56). С. 101–103.

16. Shepel' G. G., Vakhrusheva V. S., Dergach T. A. [et al.]. Improving the corrosion resistance and reliability of austenitic and austenitic-ferritic steel pipe // *Steel in translation*. 2009. Vol. 39, Issue 12. P. 1107–1110. DOI: 10.3103/S0967091209120183.

**ЕРЕМИН Евгений Николаевич**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Машиностроение и материаловедение»; директор машиностроительного института Омского государственного технического университета.

SPIN-код: 2894-2461  
 AuthorID (РИНЦ): 175269  
 AuthorID (SCOPUS): 6603904601  
 ResearcherID: J-4245-2013

**МИННЕХАНОВ Гизар Нигъматьянович**, директор  
 ООО «Технологический центр», г. Омск.

AuthorID (РИНЦ): 566737

**МИННЕХАНОВ Руслан Гизарович**, заместитель ди-  
 ректора ООО «Технологический центр», г. Омск.

AuthorID (РИНЦ): 566738

Адрес для переписки: weld\_techn@mail.ru

Для цитирования

Еремин Е. Н., Миннеханов Г. Н., Миннеханов Р. Г. При-  
 менение инокулирующего модифицирования для повышения  
 стойкости литого металла заготовок из нержавеющей стали  
 к межкристаллитной коррозии // Омский научный вестник.  
 2018. № 4 (160). С. 5–10. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-5-  
 10.

Статья поступила в редакцию 14.05.2018 г.

© Е. Н. Еремин, Г. Н. Миннеханов, Р. Г. Миннеханов

УДК. 621/9

DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-10-17

**Д. И. ЧЕРНЯВСКИЙ**  
**Д. Д. ГАПОН**

Омский государственный  
 технический университет,  
 г. Омск

## ПРИМЕНЕНИЕ ЗАКОНОВ СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ И ИМПУЛЬСА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ БЕСТРАНШЕЙНОЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПРОКЛАДКИ КОММУНИКАЦИЙ

Предложена инженерная методика выбора технических параметров пневмо-  
 пробойника для горизонтальной забивки стальных труб в основания доро  
 для проведения различных коммуникаций: электрические кабели, линии связи,  
 канализация и т.д. Методика основана на использовании уравнения связи за-  
 конов сохранения энергии и импульса, а также уравнения коэффициента вос-  
 становления. Рассмотрены примеры горизонтальной забивки труб в сжимае-  
 мом грунте. Введено понятие «дополнительная масса» для учета силы трения  
 грунта о трубу. Данная величина добавляется к массе трубы. Она позволяет  
 оценить КПД передачи кинетической энергии от бойка пневмоударника к тру-  
 бе по мере увеличения заглубления трубы в грунт.

**Ключевые слова:** теория удара, подземная прокладка коммуникаций, пневмо-  
 ударник, масса бойка, законы сохранения энергии и импульса.

**Введение.** К настоящему времени накопилось  
 значительное количество исследований по теории  
 удара. Кратко рассмотрим основные публикации  
 по теории удара.

В первую очередь, необходимо выделить не-  
 сколько основных трудов Jonson K. L. [1], Goldsmith  
 W. [2], Stronge W. J. [3], Александров Е. В. и др.  
 [4], Кильчевский Н. А. [5], Алабужев П. М. и др.  
 [6], которые рассматривают все основные теории  
 удара: центральный удар твердых деформируемых  
 тел; удар твердых деформируемых тел в плоскости  
 и в пространстве; численное моделирование удар-  
 ного процесса, удар тел переменной жесткости  
 и другие теории.

Другие авторы изучают отдельные конкрет-  
 ные направления теории удара. В работах [7–25]  
 изучаются теоретические вопросы, связанные  
 с распространением ударных волн в материале, по-  
 строением полей напряжений и деформаций в со-  
 ударяющихся телах. Стихановский Б. Н. [7] изучает  
 энергетические соотношения при ударе. Akkas N.

и др. [8] изучают распространение упругой волны  
 в стержне. Akakawa K. и др. [9] рассматривают  
 экспериментальную установку стреляющую мя-  
 чами для гольфа с целью поражения стальной ме-  
 таллической пластины. С помощью методов ско-  
 ростной фотографии определяются деформации  
 мяча и строятся графики зависимости силы удара  
 в зоне контакта от времени. Chernyavskii D. I. [10]  
 рассматривает вопрос расчета ударной силы при  
 упруго-пластическом контакте тел и построение  
 поля напряжений в данных телах, а в [11] опреде-  
 ляет границы перехода сферического фронта удар-  
 ной волны в плоский фронт для соударяющихся  
 стержней. Connesson N. и др. [12] рассматривают  
 экспериментальное распределение энергии в ходе  
 ударного процесса. Авторы отмечают, что главное  
 распределение энергии происходит в первом цикле  
 ударного процесса. Динамическое разрушение бе-  
 тона исследуют Goldsmith W. и др. [13], а проник-  
 новение бойка в стальную конструкцию изучают  
 Golubev V. K. и др. [14]. Исследование напряжений