

**Ключевые слова:**

прокатка, лента, сталь, импульсный ток, качество, эффективность, безопасность

СТАН ДЛЯ ПРОКАТКИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ БЕЗ ОТЖИГОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА

Олег ТРОИЦКИЙ, Станислав КИМ, Владимир СТАШЕНКО

Приведены данные по опытно-промышленному образцу прокатного стана для получения ленты из нержавеющей стали толщиной 0,3 мм без промежуточных отжигов и окисной пленки, из заготовки толщиной 2 мм и шириной 100 мм. Показана эффективность использования импульсного тока высокой плотности.

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что при холодной обработке металлов давлением (ОМД) быстро повышается сопротивление металла деформированию за счет упрочнения и возникновения нежелательных структурно-фазовых превращений, спровоцированных механическими перенапряжениями. В частности, в нержавеющей стали в процессе ОМД возникает мартенсит деформации. Поэтому практически после каждой операции в процессе ОМД, например прокаткой, приходится проводить дорогостоящие и энергоемкие операции промежуточных аустенизирующих отжигов в защитной атмосфере либо в вакууме.

Прошедшие обычную ОМД заготовки характеризуются, как правило, небольшой величиной циклической долговечности. Они не обладают достаточным ресурсом остаточной пластичности в силу наличия внутренних микродефектов. При горячей ОМД происходит окисление и потеря металла на окислы, а также растрескивание. Проводимые промежуточные отжиги не только энергозатратны, но и разрывают процесс производства на части, несоизмеримые по времени.

Указанные недостатки существующих способов ОМД приводят к большим энергозатратам, ухудшают качество получаемой продукции, создают экологически неблагоприятные условия в цехах, особенно на среднем металлургическом переделе. Получаемая продукция дорожает и становится менее конкурентоспособной.

В последнее время научно обоснованы, экспериментально разработаны и реализованы различные способы усовершенствования процессов ОМД, включающие применение: ультразвуковых колебаний, многовалковых калибров, роликовых волок и др.

Вместе с тем большие возможности для решения дает переход в ОМД в область более высокой пластичности при применении электрического тока. Так, индукционный бесконтактный нагрев целесообразно применять для заготовок большого сечения и операций, требующих нагрева не ниже 600 °С [1]. Местный электроконтактный нагрев (ЭКН) выгоден для заготовок сечением менее 300 мм² [2, 3]. По экономическим показателям удельный расход электроэнергии при ЭКН на 35% ниже, чем при нагреве ТВЧ [4]. Применение установок электроконтактного нагрева для теплого и горячего волочения бунтовой стали позволяет существенно сократить технологический цикл производства [5]. Однако в установках ЭКН, разработанных ВНИИЭТО и ВНИИметиз, используется переменный ток промышленной частоты. Для изделия диаметром до 8 мм при нагреве до 700 °С мощность установки составляет 190 кВ·А [6].

Импульсный ток высокой плотности (ИТВП) безопасного напряжения позволяет существенно снизить сопротивление металла деформированию и повысить пластичность металла при сопут-

ствующем нагреве, не превышающем всего 100–200 °С при амплитудной плотности тока порядка 500–800 А/мм².

Прямое электропластическое действие тока возникает непосредственно в зоне деформации металла в условиях, когда заготовка находится под механическим напряжением выше предела текучести [7, 8]. Наибольший эффект на пластическую деформацию оказывает импульсный ток [9]. Объясняется это его прямым действием на электронную и решеточную подсистемы металла. Импульсный ток высокой плотности посредством действия электронов проводимости создает «давление» электронным ветром на дислокации и иные дефекты, участвующие в пластической деформации. Импульсы тока и напряжения (энергии) создают вибрации решетки, подобные действию ультразвука, за счет пинч-эффекта (пондеромоторного действия тока собственным импульсным магнитным полем в проводящей среде) [10]. Установлен также механизм депиннинга (открепления) дислокаций от парамагнитных примесей металла под действием собственного магнитного поля тока за счет спиновой конверсии и спин-зависимой реакции дислокаций, приводящей к существенному разупрочнению [11]. Все эти механизмы объединяет понятие электропластический эффект (ЭПЭ), который действует в условиях деформации, в том числе при обработке металлов и сплавов давлением в зоне деформации [12–14].

ЭПЭ во время ОМД проявляется в снижении сопротивления металла деформированию на 25–30% (что определяется, в частности, по снижению на указанную величину потребления электроэнергии приводами станов), увеличении его пластичности, включая остаточную, на десятки процентов, в улучшении структуры, текстуры и фазового состава. При прокатке, волочении и вытяжке нержавеющей сталей практически полностью подавляется аустенитно-мартенситное фазовое γ - α -превращение, что делает ненужными операции дорогостоящих и энергоемких аустенизирующих отжигов заготовок.

ЭПЭ в силу кратковременности действия импульсов тока длительностью 150–200 мкс даже при больших амплитудных значениях тока, достигающих в отдельных случаях 10^5 – 10^6 А/см² с частотой следования до сотен гигагерц, не сопровождается большим нагревом заготовок. Сопутствующий нагрев заготовок, как правило, не превышает 100–200 °С [15].

Таким образом, ИТВП создает мощное (мгновенное выделение энергии в зоне деформации металла достигает значений 10^3 – 10^4 кВт/см³) и одновременное воздействие на электронную и решеточную подсистемы деформируемого

металла, что вызывает указанные выше внешние и внутренние технологически важные эффекты.

ПРОКАТНЫЙ СТАН ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЛЕНТЫ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

Для процессов ЭПП полос и листов стали небольших сечений при небольших скоростях прокатки ($v_n < 0,5$ м/с), а также для скоростных процессов ЭПП ($v_n > 0,5$ м/с) для тонколистовых заготовок пригодны следующие режимы импульсного тока: амплитудная плотность тока $J_m = 5 \cdot 10^5$ – 10^6 А/см²; частота импульсов $f = 10^4$ Гц; длительность импульсов $t_{\text{и}} = (40$ – $50) \cdot 10^6$ с; скважность импульсного процесса $Q = 1$ – 2 ; коэффициент заполнения импульсами порядка 1–0,5.

Снижение скорости прокатки v_n не сказывается существенным образом на соотношении тепловых действий импульсного и постоянного тока. Вместе с тем снижение v_n оказывает положительное влияние на процесс ЭПП, так как скорость дрейфа электронов v_e начинает превышать скорость пластической деформации металла в рабочей зоне ЭПП, то есть выполняется условие $v_e > v_n$, необходимое для реализации ЭПЭ. По этим же причинам на высокоскоростных станках при $v_n = 3$ – 5 м/с не имеет смысла вводить технологию ЭПП, так как условие $v_e > v_n$ заведомо не будет выполняться даже при труднореализуемых в динамическом режиме плотностях тока $J_m = 10^6$ А/см². Технологию ЭПП целесообразно использовать лишь при низких и средних скоростях прокатки (не более 0,5 м/с), либо осуществлять высокоскоростную ЭПП на очень тонких заготовках.

В работе установлены режимы импульсного тока для прокатки нержавеющей стали: амплитудная плотность тока $J_m = 10^4$ – 10^5 А/см², длительность импульсов $t_{\text{и}} = 150$ – $200 \cdot 10^{-6}$ с, частота следования импульсов $F = 500$ – 800 Гц.

Совместно с сотрудниками ЦАГИ был разработан и создан опытный образец прокатного стана, работающего по безотжиговой технологии ЭПП для получения полосы из нержавеющей стали с использованием ЭПЭ в зоне деформации без применения промежуточных отжигов. Стан создавался по заказу Южной Кореи.

В процессе испытаний стана производилась многократная прокатка полосы из нержавеющей сталей типа 12X18H9 и 12X18H10T от начальной толщины 2 мм до конечной толщины 0,3 мм без промежуточных отжигов. При этом за счет рационального выбора параметров импульсного тока было предотвращено появление окисной пленки. Скорость прокатки выдерживалась в пределах

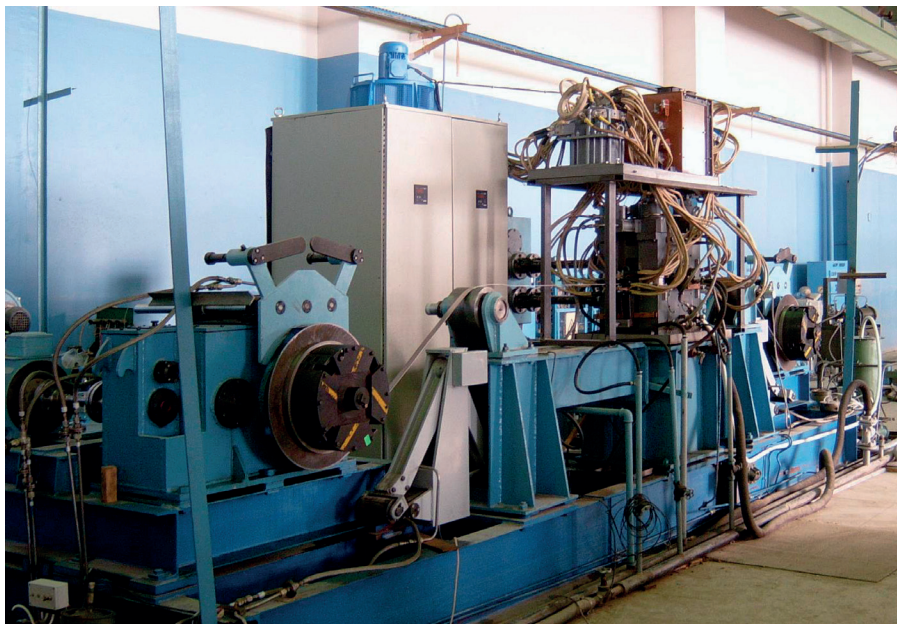


Рис. 1. Общий вид стана ЭПП конструкции ЦАГИ

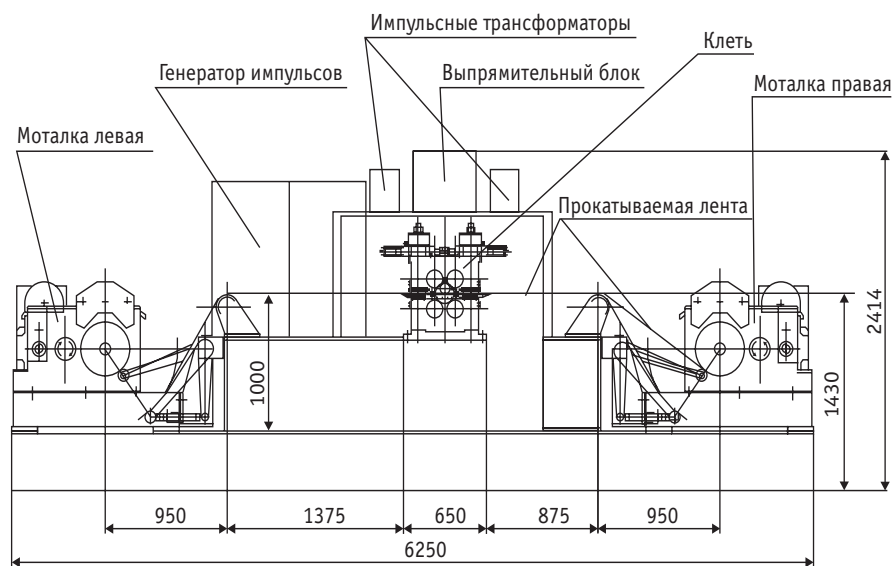


Рис. 2. Стан электропластической прокатки стальной ленты:
 1, 6 – приемно-сдаточный механизм для обрабатываемой ленты,
 2, 3 – генератор импульсного тока; 4 – блок управления,
 5 – прокатная клеть с импульсным током в 3Д, 7 – устройство противонапряжения ленты

0,3–0,5 м/с. Характеристики созданного оборудования обеспечивали скорость прокатки до 1 м/мин. Суммарная электрическая мощность на режиме максимального потребления составляла примерно 150 кВт; установленная мощность – 210 кВт; максимальное амплитудное значение импульсного тока I_m – 45 кА. Плотность тока J_m в стальной полосе в зоне деформации

составляла 300–800 А/мм² в зависимости от текущей толщины полосы. Были проведены испытания созданного оборудования и систем прокатного стана, которые подтвердили соответствие созданного оборудования современным требованиям.

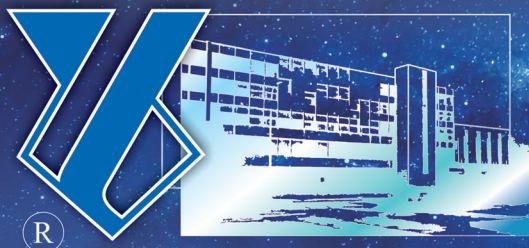
Параметры стана СЭПР позволили реализовать режим ЭПП на основе его использования для полосы из нержавеющей стали толщиной 2 мм и шириной до 100 мм без промежуточных отжигов за счет «торможения» процесса аустенитно-мартенситного фазового превращения и упрочнения (нагартовки) в процессе прокатки стальной полосы.

На рис. 1 приведен общий вид, а на рис. 2 – схема опытно-промышленного стана для получения ленты из нержавеющей стали с использованием электропластического эффекта в зоне деформации металла.

Отдельные узлы стана представлены на рис. 3–5. Результаты измерений физико-механических свойств стальной полосы после обычной и электропластической прокатки приведены на рис. 6–7.

В работе использовалась лента из нержавеющей стали различного типа. Ширина ленты составляла 100 мм, начальная толщина – 2,0 мм, конечная толщина – 0,3 мм с погрешностью прокатки не более 0,01 мм.

Прокатный стан обеспечил прокатку ленты из нержавеющей стали от начальной до конечной толщины без промежуточных отжигов. Не допускалось появление окисной пленки на поверхности ленты в процессе ее прокатки. Максимальная скорость прокатки составила до 60 м/с (для лент толщиной 0,3 мм). Суммарная потребляемая электрическая мощность достигала примерно 200 кВт.



ВНИИИНСТРУМЕНТ

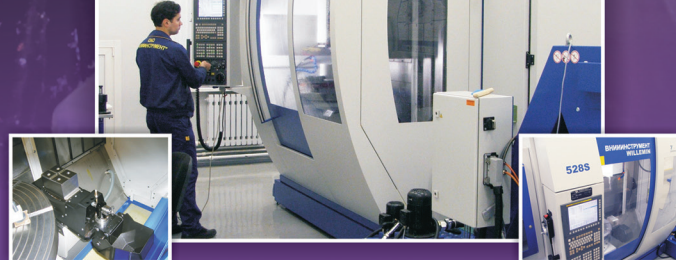
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

Центр компетенций в области
ультрапрецизионных технологий,
мобильных станков
и инструментального производства

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ И РАЗВИТИЯ АО «ВНИИИНСТРУМЕНТ»:

- создание комплексных отечественных инновационных решений (разработка технологических процессов и изготовление ультрапрецизионных технологических модулей с ЧПУ, сверхвысокоточного контрольно-измерительного оборудования, специального инструмента из сверхтвердых материалов, специальной технологической оснастки) для ультрапрецизионной обработки алмазным точением, фрезерованием и шлифованием особо точных ответственных деталей из труднообрабатываемых материалов с точностью формы P-V < 100 нм и оптическим качеством поверхности Ra 5 нм;
- разработка и изготовление многокоординатных токарно-фрезерно-шлифовальных роботов и станков с ЧПУ объектного базирования с аддитивной функцией автоматической контурной наплавки и сварки для изготовления и ремонта крупногабаритного оборудования в судостроении, атомной промышленности, тяжелом и энергетическом машиностроении (при этом станки устанавливают непосредственно на обрабатываемые детали);
- разработка конструкций, технологий изготовления и производство наукоёмких инструментов из наноструктурных, субмикронных и ультрадисперсных материалов, в т.ч. со специальными покрытиями, для высокопроизводительной экологически чистой обработки, организация экономически оптимальной системы комплексного инструментального обеспечения предприятий;
- проведение технологического аудита предприятий, экспертиза проектов техперевооружения предприятий и предложений по закупкам оборудования, прежде всего, за счет средств госбюджета, обеспечивающих сокращение инвестиционных расходов, повышение качества проектов и результатов их реализации;
- создание инновационных технологий высокоточной обработки сложных деталей из металлических и композиционных материалов, разработка и реализация «под ключ» проектов технологического перевооружения предприятий, поставка, пуско-наладка и сервисное обслуживание в течение всего жизненного цикла завершённых экологически чистых технологических систем, обеспечивающих повышение производительности до 10 и более раз, сокращение энергопотребления и производственных площадей в 2-3 раза;
- разработка максимально детализированных технических заданий на специальное высокопроизводительное оборудование для гарантированного достижения показателей инновационных технологий при минимальной себестоимости;
- проведение комплексных научно-исследовательских, опытно-конструкторских и инновационно-технологических работ (НИОКР=R&D&E) в области обрабатывающих технологий, автоматизированного оборудования и наукоёмкого инструмента, обеспечение их освоения и серийного выпуска российскими предприятиями станкоинструментальной промышленности;
- исследование процессов резания металлических и композиционных материалов с получением объективной информации для научно-обоснованной оптимизации параметров технологических процессов обработки деталей машин и характеристик необходимого оборудования;
- стандартизация и сертификация инструмента и инструментальных материалов, метрологическая и патентная экспертиза.

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ
ТОЧНОСТЬ
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ



Российская Федерация, 107023, г. Москва, Б. Семеновская ул., дом 49

телефон: +7 (495) 366-94-11
факс: +7 (495) 366-92-77

e-mail: vniiinstrument@vniiinstrument.ru

www.vniiinstrument.ru

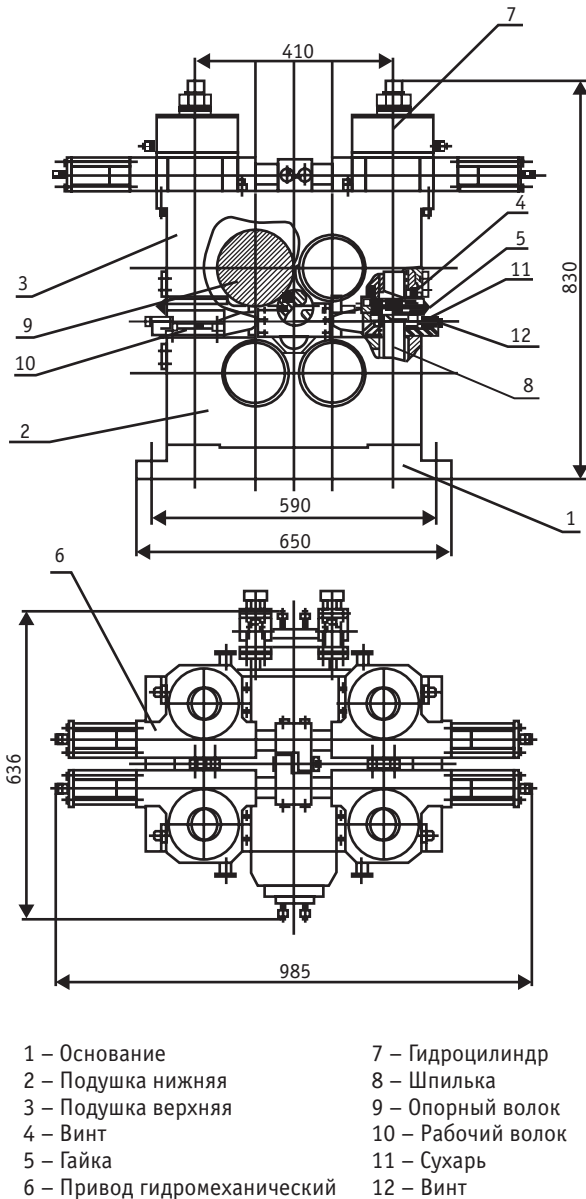


Рис. 3. Прокатная клеть и скользящие контакты

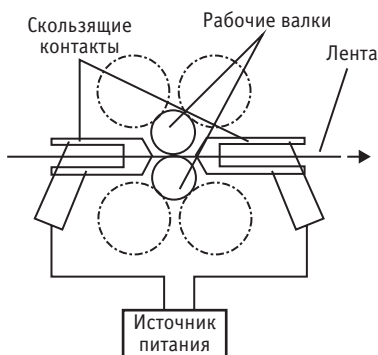


Рис. 4. Схема и вид скользящих контактов



Рис. 5. Прокатка стальной полосы по технологии ЭПП

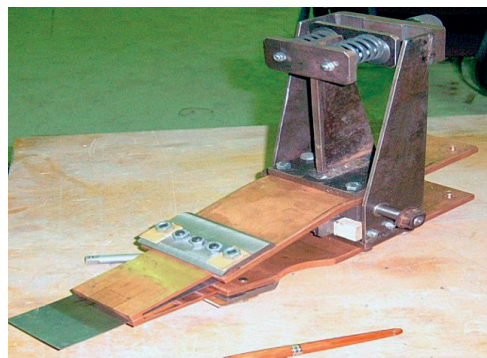
КОНСТРУКЦИЯ СТАНА

Стан включает в себя следующее оборудование и системы:

- технологическое оборудование (прокатная клеть, два устройства подачи-приема ленты (моталки), основание (рама), устройства жидкостного охлаждения рабочих валков и ленты, электроконтактные устройства для подведения тока к прокатываемой ленте);
- гидравлическое оборудование (основная и вспомогательная гидросистемы);
- электротехническое оборудование (главный привод, привода устройств подачи-приема ленты, три шкафа для подачи электропитания на приводы и источники питания для электропластификации ленты);
- систему управления и измерений (пульт управления, датчики измерения положения

элементов клетки и режимов прокатки).

Конструкция стана предусматривала 6-валковую схему прокатной клетки с двумя парами приводных опорных валков и парой рабочих валков. Устройство приема-подачи ленты (моталки) должно обеспечивать работу стана в реверсивном режиме, обеспечивая при этом заданное натяжение ленты. Моталки должны иметь оснащение



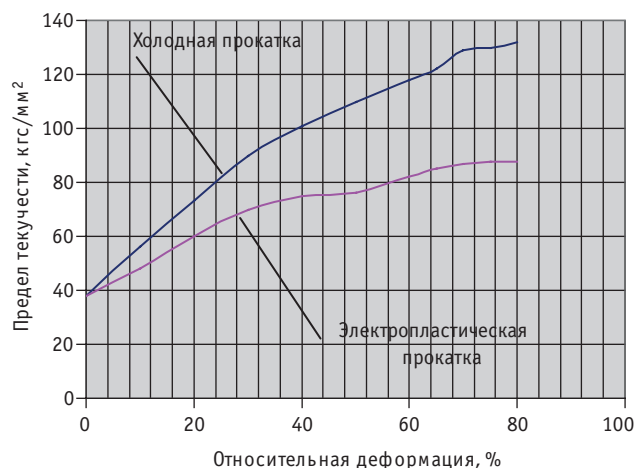


Рис. 6. Изменение предела текучести

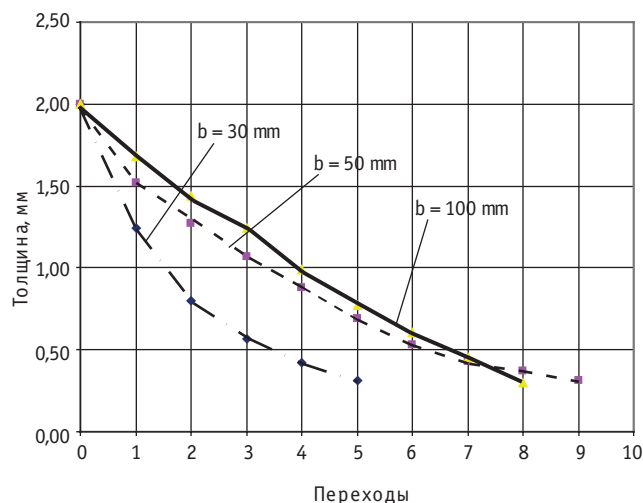


Рис. 7. Изменение толщины стальной полосы по переходам

устройствами съема прокатанной ленты, а также рычажными прижимами, которые препятствуют «распушению» прокатанной ленты. Основные характеристики их конструкции следующие: диаметр барабана – 400 мм; максимальный диаметр рулона – 1000 мм; максимальное усилие натяжения ленты – 8 кН. Основание для фиксации агрегатов (клетей и моталок) выполнялось в виде плоской сварной рамы, которая обеспечивала необходимую точность взаимного расположения агрегатов прокатного стана без дополнительного крепления их к бетонному полу.

Электроконтактные устройства обеспечивали возможность подведения тока к прокатываемой ленте согласно схеме рис. 8 [16].

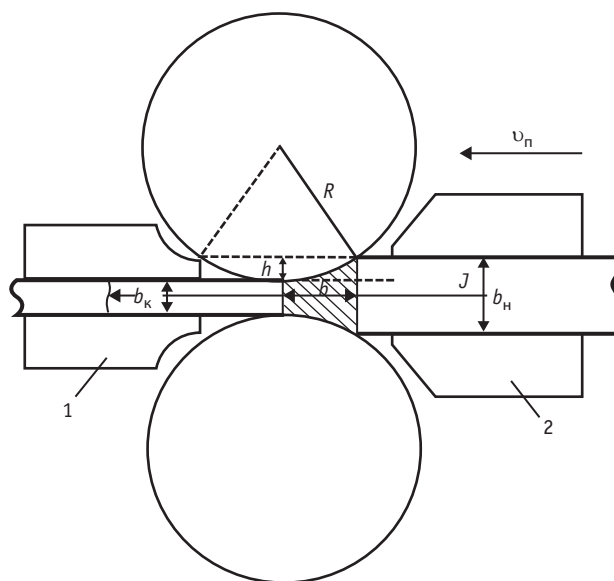


Рис. 8. Способ подведения тока двумя скользящими контактами до и после ЗД (1 и 2 – скользящие контакты)

Предусматривалось охлаждение контактов и рабочих валков.

Предусматривались две автономные гидравлические системы стана:

- основная гидросистема, обеспечивающая работу гидроприводов прокатной клетки и моталок;
- вспомогательная гидросистема, обеспечивающая смазку подшипников опорных валков и их охлаждение.

ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСНОГО ТОКА

Одним из наиболее ответственных элементов стана ЭПДМ является источник питания для электрической обработки прокатываемой ленты во время прокатки, а именно генератор импульсного тока (ГИТ).

Характеристики генератора импульсного тока:

- напряжение питания 380/220 В промышленной частоты 50 (60) Гц;
- генератор выдает импульсы тока колоколообразной формы;
- генератор имеет максимальные амплитуды тока при номинальной нагрузке 45,0 кА;
- длительность импульсов тока по основанию импульсов при номинальной нагрузке составляет 200 мкс;
- частота повторения импульсов регулируется в пределах от 1 до 1000 Гц;
- охлаждение воздушно-принудительное.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение импульсного тока при ЭПП имеет следующие преимущества по сравнению с обычной прокаткой:

- производительность станов повышается в 1,5 раза;
- устраняются операции промежуточных отжигов;
- уменьшается анизотропия материала;
- энергопотребление приводами прокатных станов снижается на 25–30%;
- повышается остаточная пластичность заготовок;
- длина заготовок увеличивается на 10–15% за счет сокращения их ширины;
- подавляются нежелательные структурно-фазовые превращения.

Таким образом, подтверждена возможность получения ленты из нержавеющей стали без промежуточных отжигов с использованием ИТВП, при этом достигается высокое качество заготовки при существенном снижении трудоемкости изготовления полуфабрикатов.

Применение технологии ЭПП на современных станах на импульсном токе открывает новые возможности для автоматического регулирования процесса прокатки. Путем изменения амплитуды и частоты следования импульсов по сигналам датчиков давления на валках можно усиливать или, напротив, ослаблять электропластическое действие тока. В результате будет уменьшаться или увеличиваться толщина проката, а также (в обратном соотношении) ширина заготовки. При этом зазор между валками останется без изменений и удастся избежать нежелательного увеличения толщины заготовки (подката) при упругом отжиге валков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головин Г. Ф., Зимин Н. В. Технология термической обработки металлов с применением индукционного нагрева. — М.: Машиностроение, 1979. 119 с.
2. Коврев Г. С. Электроконтактный нагрев при обработке цветных металлов. — М.: Металлургия, 1975. 306 с.
3. Гриднев В. Н., Гаврилюк В. Г., Мешков Ю. Я. Прочность и пластичность холоднодеформируемой стали. — Киев: Наукова думка, 1974. 231 с.
4. Тюрин А. В., Дианов А. И. Электроконтактный нагрев стальных заготовок // Сталь. 1979. № 4. С. 298–303.
5. Торчинский Е. М., Хасин Г. А., Чукина В. Г. Теплое волочение бунтовой стали // Сталь. 1979. № 11. С. 1054–1057.
6. Романов Д. И. Электроконтактный нагрев металлов. — М.: Машиностроение, 1965. 250 с.

7. Троицкий О. А. Электромеханический эффект в металлах // Письма в ЖЭТФ. 1969. Т. 2. № 10. С. 18–22.
8. Троицкий О. А., Розно А. Г. Электропластическая деформация в металлах // Физика твердого тела. 1970. Т. 12. № 1. С. 203–209.
9. Стащенко В. И., Троицкий О. А. Влияние формы и режимов прохождения импульсов тока на пластическую деформацию кристаллов цинка // ДАН СССР. 1982. Т. 267. С. 638–640.
10. Скворцов О. Б., Стащенко В. И., Троицкий О. А. Упругие деформации проводников при действии импульсов тока // Машиностроение и инженерное образование. 2018. № 1. С. 33–42.
11. Molotskii M., Fleurov V. Magnetic effects in electroplasticity of metals // Physical Review B. 1991. V. 52. № 22. P. 311–317.
12. Троицкий О. А., Баранов Ю. В., Аврамов Ю. С., Шляпин А. Д. Физические основы и технологии обработки современных материалов (теория, технологии, структура и свойства). — Москва — Ижевск: Изд-во АНО ИКИ, 2004. Т. 1. 563 с.; Т. 2. 467 с.
13. Okazaki K., Kagava M., Conrad H. Electroplastic effect in metals // Scr. Met. 1978. V. 12. № 11. P. 1063–1068.
14. Okazaki K., Kagava M., Conrad H. Additional results on the electroplastic effect in metals // Scr. Met. 1979. V. 13. № 4. P. 277–280.
15. Баранов Ю. В., Троицкий О. А., Аврамов Ю. С., Шляпин А. Д. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы (монография). — М.: Изд-во МГИУ, 843 с.
16. Троицкий О. А., Стащенко В. И. Модернизация станочного оборудования под электропластическую деформацию металла // СТАНКОИНСТРУМЕНТ. 2019. № 1 (014). С. 56–62.

ТРОИЦКИЙ Олег Александрович — доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории комплексных физико-механических исследований материалов ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

КИМ Станислав Константинович — кандидат технических наук, ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

СТАЩЕНКО Владимир Иванович — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

19-я Международная
выставка сварочных
материалов, оборудования
и технологий

weldex
россварка

15–18 октября 2019

Москва, КВЦ «Сокольники»

Забронируйте стенд
www.weldex.ru



Организатор:
Группа компаний ITE
Тел.: +7 (499) 750-08-28
E-mail: weldex@ite-expo.ru

Официальная поддержка:



Генеральный информационный партнер:



Журнал
«Сварочное производство»