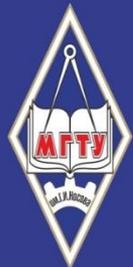


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МАГНИТОГОРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Г.И. НОСОВА»

**Сравнительный анализ формирования структуры и свойств при
лазерной сварке полосы из нелегированной и
микролегированной низкоуглеродистой стали в непрерывных
агрегатах**





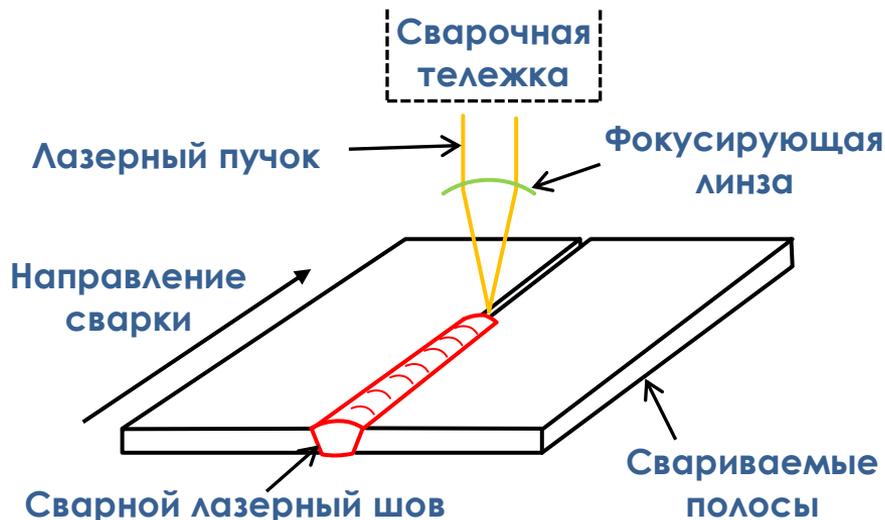
МГТУ

МАГНИТОГОРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Г. И. НОСОВА

Марка стали	Содержание химических элементов, %											
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	N	Al	Ti	Nb
10пс	0,110	0,080	0,520	0,030	0,034	0,027	0,02	0,023	0,004	0,042	-	-
08пс	0,080	0,040	0,410	0,020	0,025	0,030	0,03	0,055	0,005	0,048	-	-
08Ю	0,070	0,020	0,330	0,022	0,020	0,034	0,03	0,044	0,005	0,060	-	-
006/IF	0,005	0,009	0,134	0,007	0,007	0,027	0,02	0,022	0,006	0,050	0,050	0,046

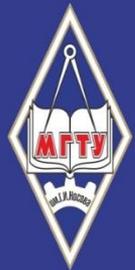
Толщина полос 0,4-1 мм, ширина полос 1400 мм

Схема лазерной сварки



Основные параметры лазерной сварки

- мощность лазера (максимальное значение 3,5 кВт);
- скорость сварки (1 – 12 м/мин);
- расстояние расфокусировки лазера по отношению к поверхности полосы;
- мощность предварительного и последующего нагревов (максимальное значение 25 кВт).



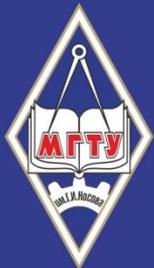
МГТУ

МАГНИТОГОРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Г. И. НОСОВА

Лазерная сварочная тележка стыкосварочной машины фирмы Miebach

3



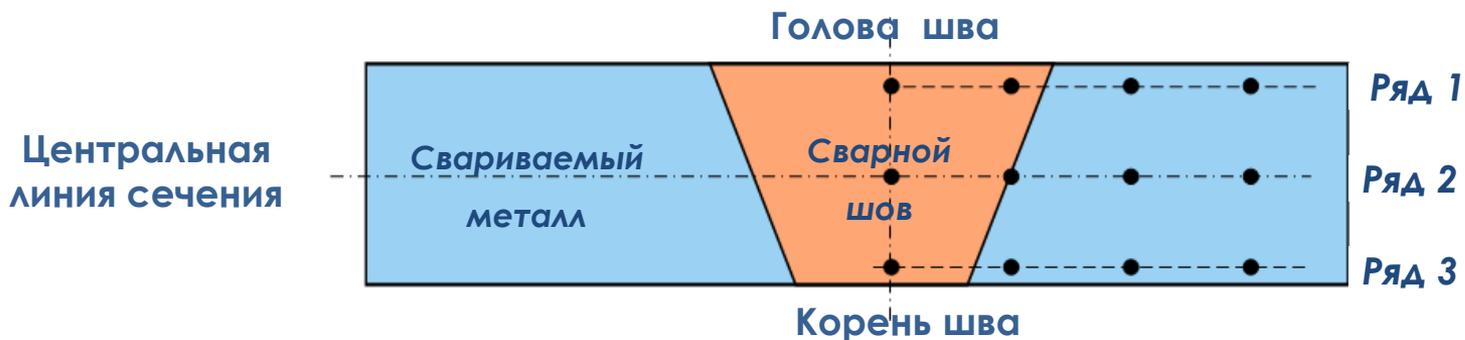


МГТУ

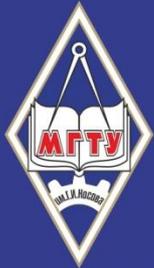
МАГНИТОГОРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Г. И. НОСОВА

- Световой микроскопический анализ: микроскоп Zeiss Axio Observer с использованием программы обработки изображений Thixomet PRO.
- Электронно-микроскопический анализ: сканирующий электронный микроскоп JEOL JSM-6490LV.
- Рентгеноспектральный микроанализ: приставка Oxford Instruments X-Max 50 к микроскопу JEOL JSM-6490 LV с системой энергодисперсионного спектрального анализа INCA Energy 450.
- Рентгеноструктурный анализ: дифрактометр Shimadzu XRD-7000.
- Испытания микротвердости (по ГОСТ 9450-76): твердомер Buehler Micromet.

Схема расположение точек измерения микротвердости

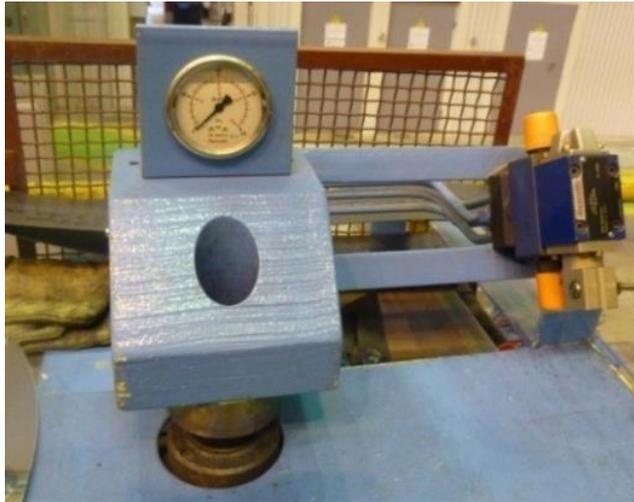


Контроль качества сварного соединения методом выдавливания лунки по Эриксену



МГТУ

МАГНИТОГОРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Г. И. НОСОВА



**Прибор для проведения
испытаний**

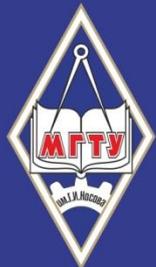


ГОДНЫЙ ШОВ



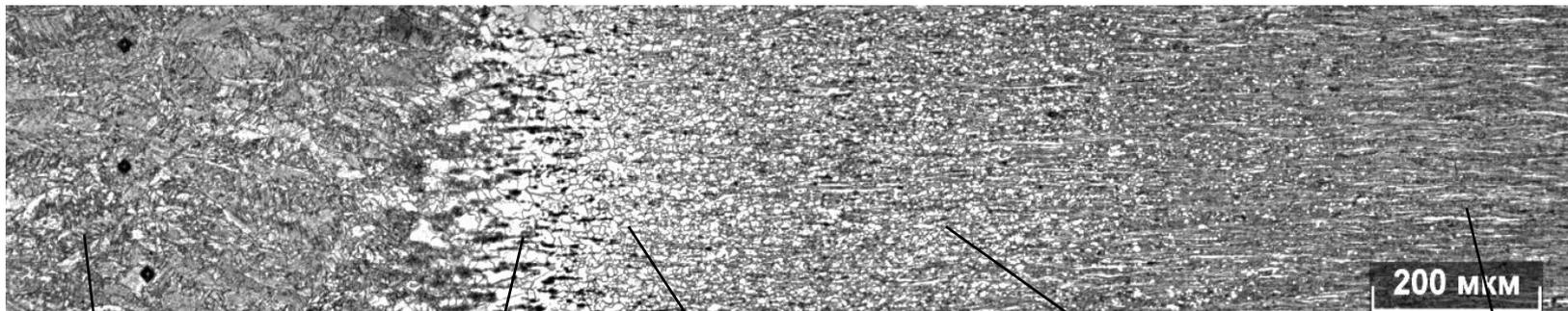
бракованный шов

Характерные структурные зоны лазерного сварного соединения полосы из стали 10пс



МГТУ

МАГНИТОГОРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Г. И. НОСОВА



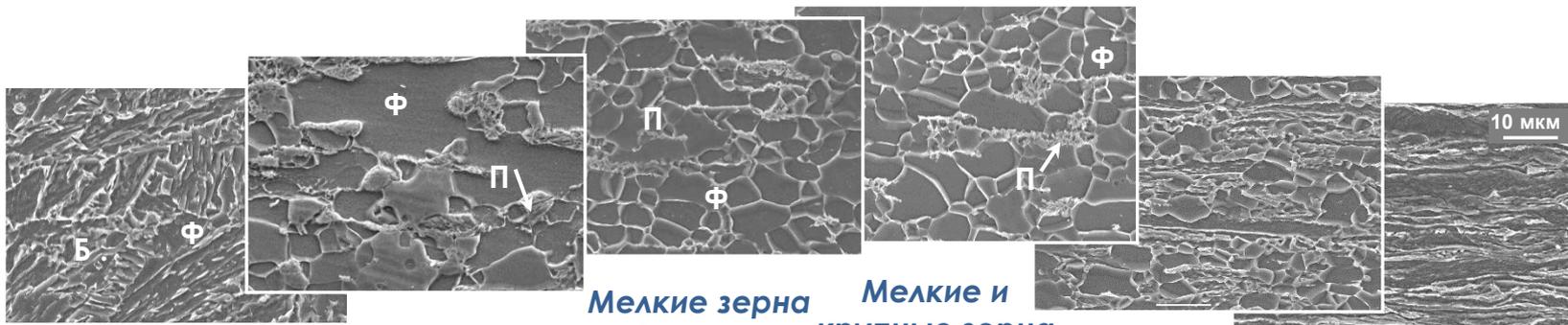
зона
кристаллизации
шва

зона
перегрева

зона
нормализации и частичной
перекристаллизации

зона
рекристаллизации

основной
металл



Бейнит и феррит

Крупные зерна
феррита

Мелкие зерна
феррита

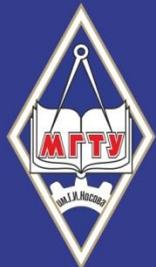
Мелкие и
крупные зерна
феррита

Рекристаллизованные
зерна феррита

Волокнистая
структура

Характерные структурные зоны лазерного сварного соединения полосы из стали 10пс

5



МГТУ

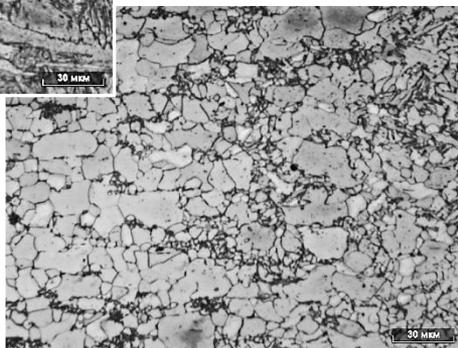
МАГНИТОГОРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Г. И. НОСОВА



**зона
кристаллизации
и шва**

**Феррит
HV10
2000 МПа**

**Бейнит
HV10
2500 МПа**



**зона
перегрева**

**Феррит
HV10
1900 МПа**

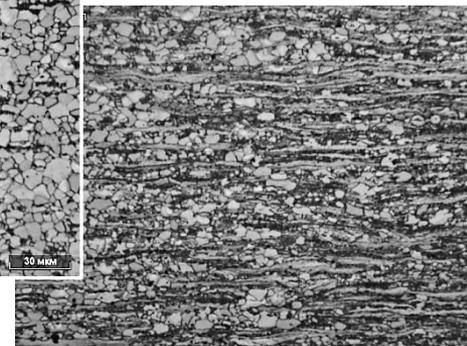
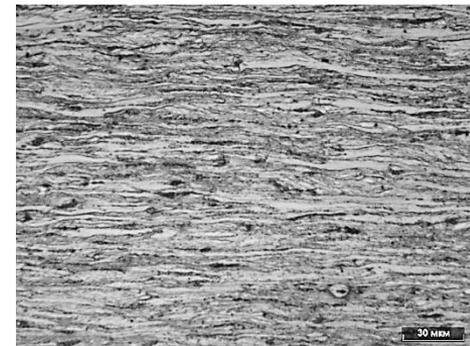


**зона
нормализации и частичной
перекристаллизации**

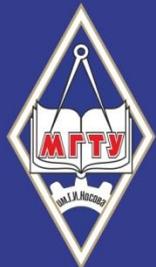
**HV10
2200 МПа**

**основной
металл**

**HV10
2200 МПа**



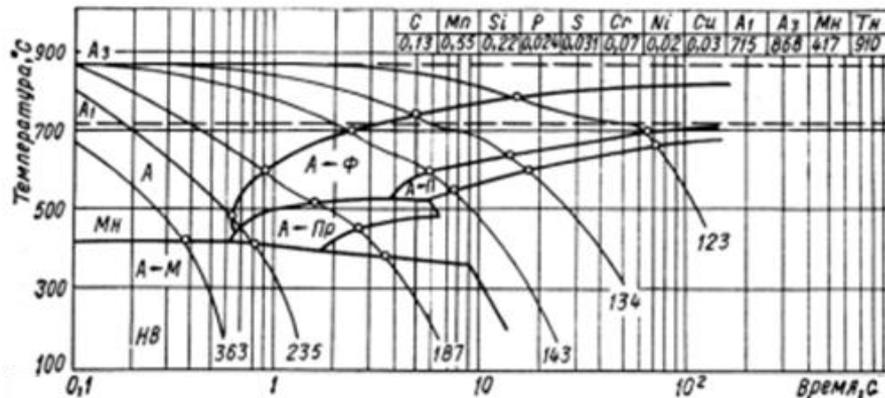
**зона
рекристаллизации**



МГТУ

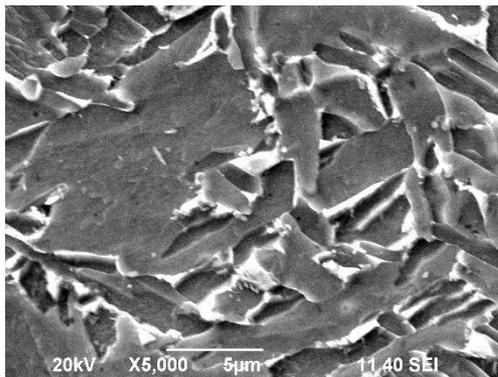
МАГНИТОГОРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Г. И. НОСОВА

Массивный (квазиполигональный) феррит и речный бейнит 6 в зоне кристаллизации шва сварного соединения полосы из стали 10пс

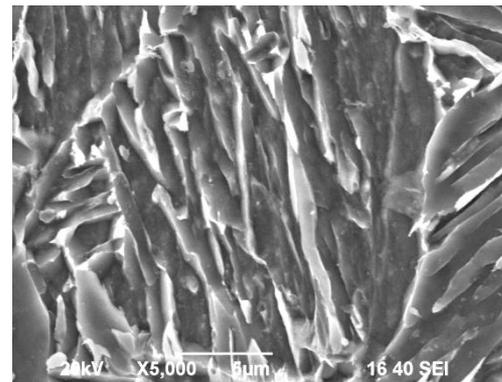


Термокинетическая
диаграмма распада
переохлажденного
аустенита стали 10пс

HV10
1986 МПа

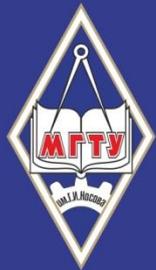


Массивный феррит



HV10
2427 МПа

Речный бейнит

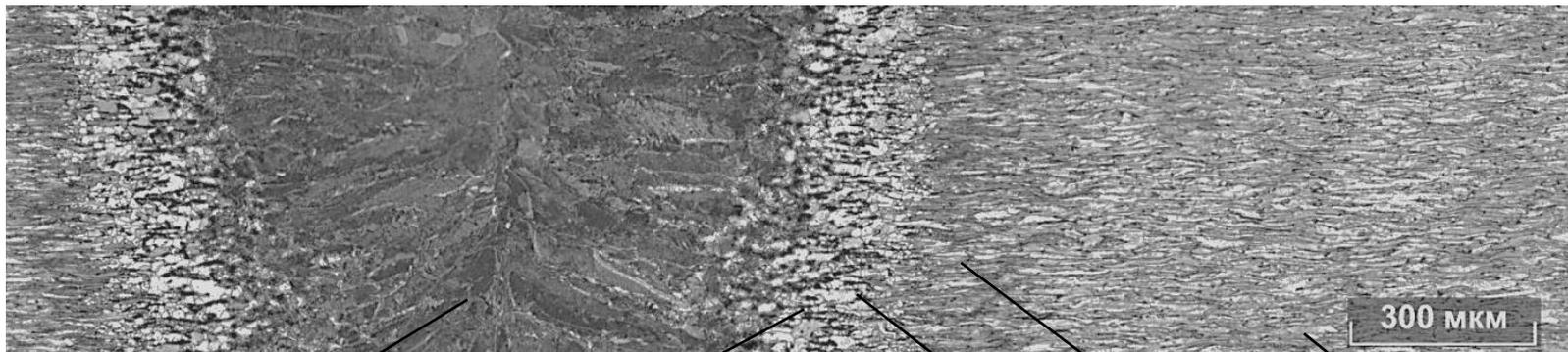


МГТУ

МАГНИТОГОРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Г. И. НОСОВА

Характерные структурные зоны лазерного сварного соединения из стали 08пс

7



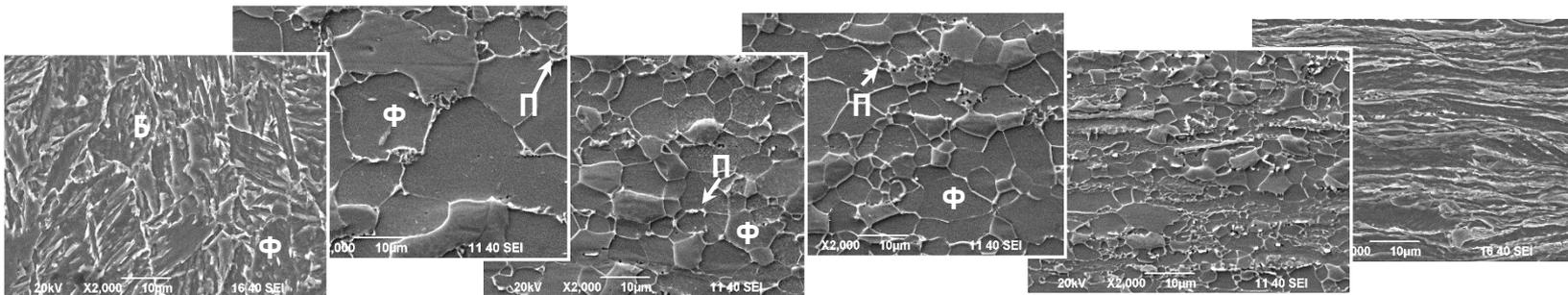
зона
кристаллизации
шва

зона
перегрева

зона
нормализации и частичной
перекристаллизации

зона
рекристаллизации

основной
металл



Бейнит и феррит

*Крупные зерна
феррита*

*Мелкие зерна
феррита*

*Рекристаллизованные
зерна феррита*

*Волокнистая
структура*

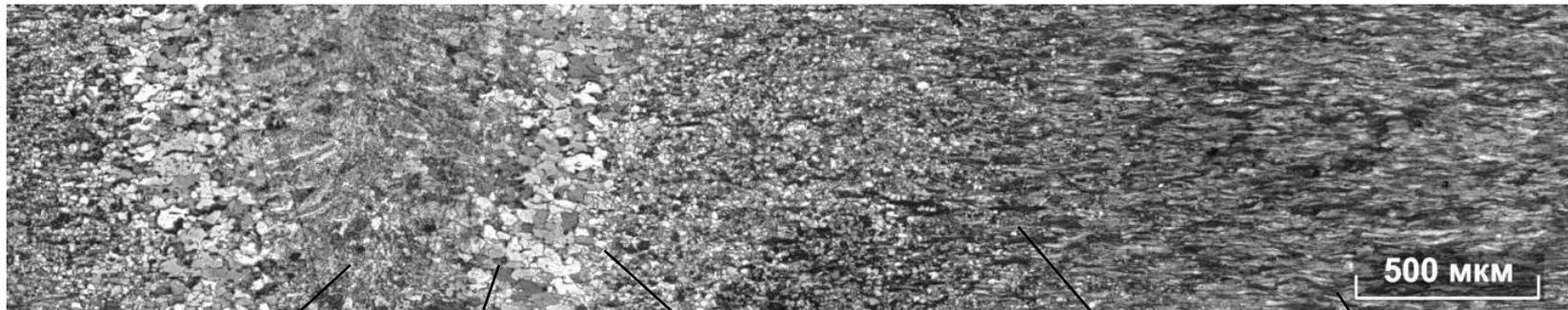


МГТУ

МАГНИТОГОРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Г. И. НОСОВА

Характерные структурные зоны лазерного сварного соединения из стали 08Ю

8



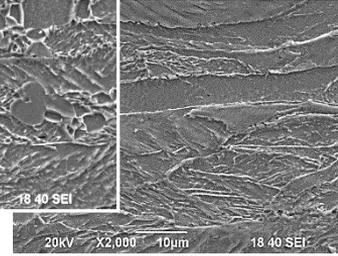
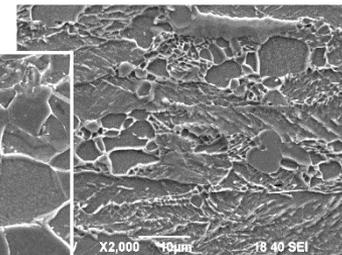
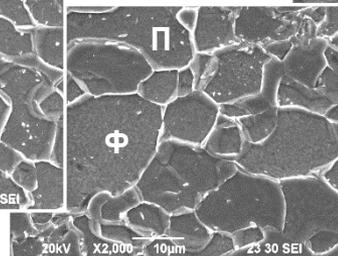
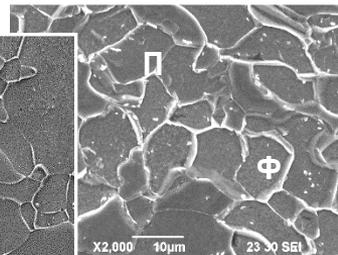
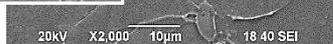
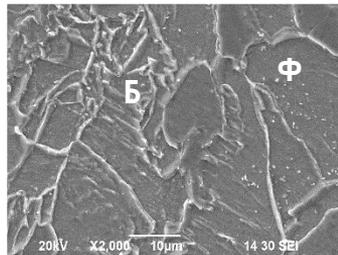
зона
кристаллизации
шва

зона
перегрева

зона
нормализации и частичной
перекристаллизации

зона
рекристаллизации

основной
металл



Бейнит и феррит

**Крупные зерна
феррита**

**Мелкие зерна
феррита**

**Мелкие и
крупные зерна
феррита**

**Рекристаллизованные
зерна феррита**

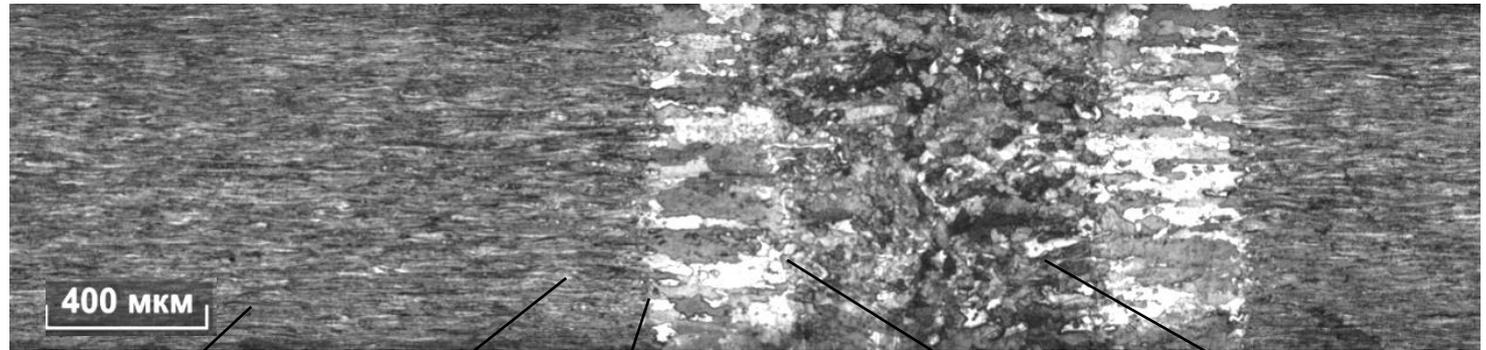
**Волокнистая
структура**

Характерные структурные зоны лазерного сварного соединения из стали 006/IF



МГТУ

МАГНИТОГОРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Г. И. НОСОВА



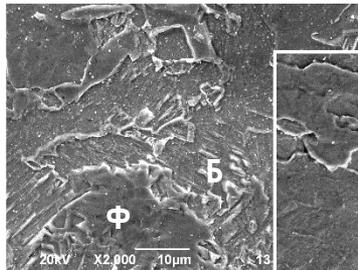
ОСНОВНОЙ
МЕТАЛЛ

зона
рекристаллизации

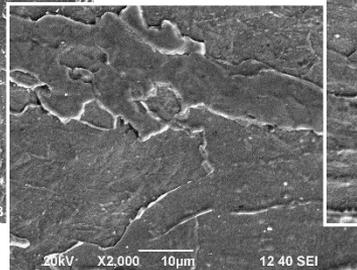
зона
нормализации и частичной
перекристаллизации

зона
перегрева

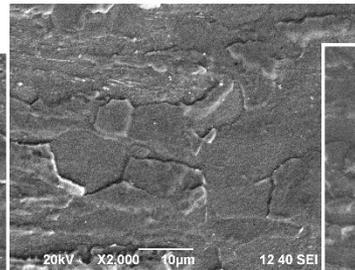
зона
кристаллизации
шва



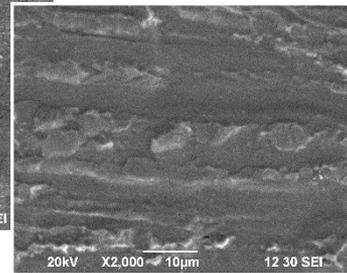
Бейнит и феррит



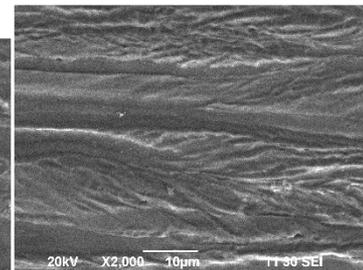
Крупные зерна
феррита



Мелкие и
крупные зерна
феррита

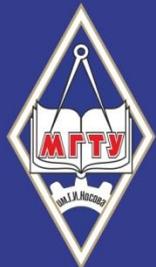


Рекристаллизованные
зерна феррита



Волокнистая
структура

Особенности формирования структуры лазерного сварного соединения из стали 006/IF



МГТУ

МАГНИТОГОРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Г. И. НОСОВА

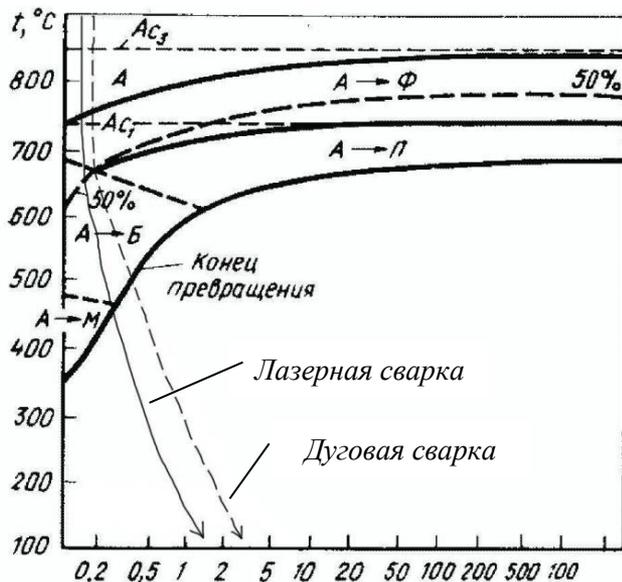
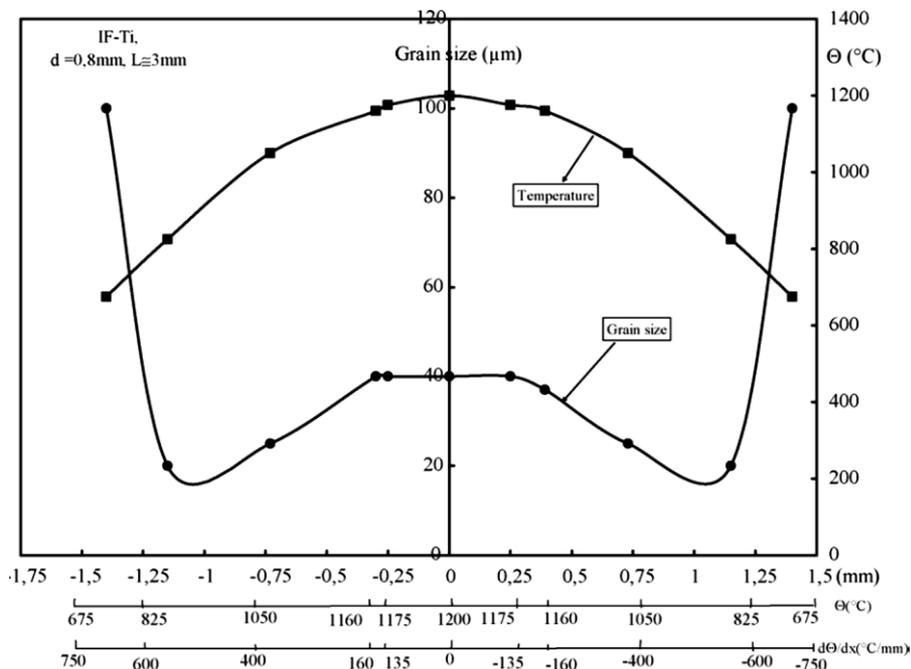


Диаграмма изотермического превращения аустенита в стали 08Ю с наложенными кривыми охлаждения металла сварных швов



Распределение температуры по сечению лазерного сварного соединения из стали микролегированной титаном и ниобием



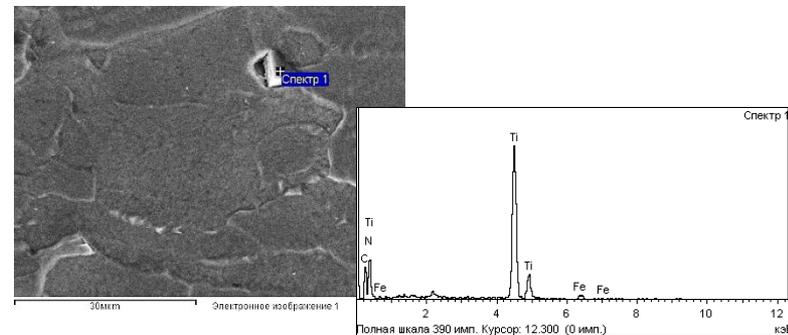
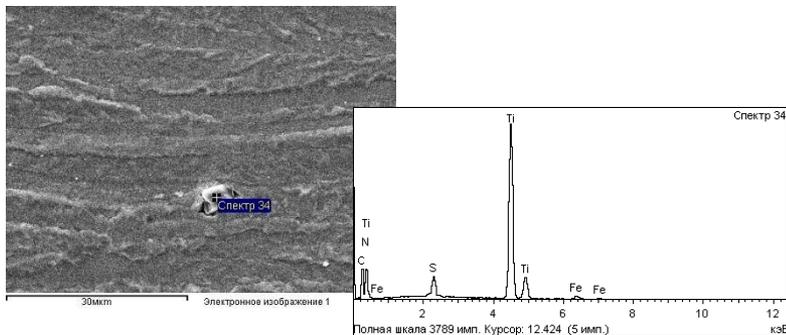
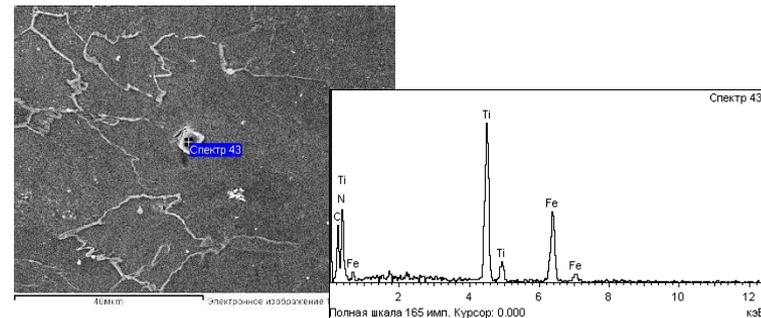
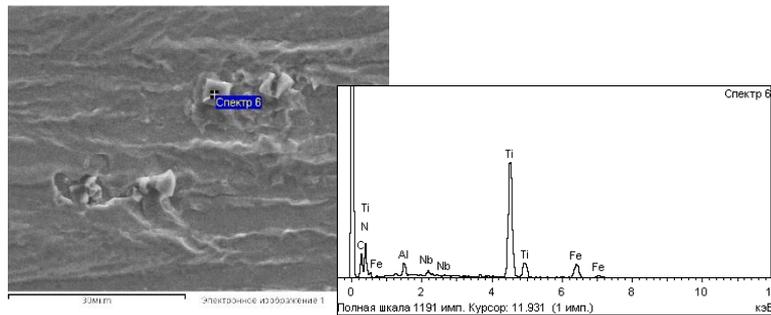
МГТУ

МАГНИТОГОРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Г. И. НОСОВА

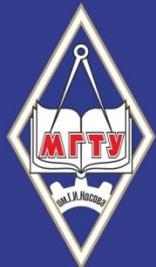
Рентгеноспектральный микроанализ частиц в структуре 10 сварного соединения полосы из стали 006/IF

Зона основного металла

Зона перегрева



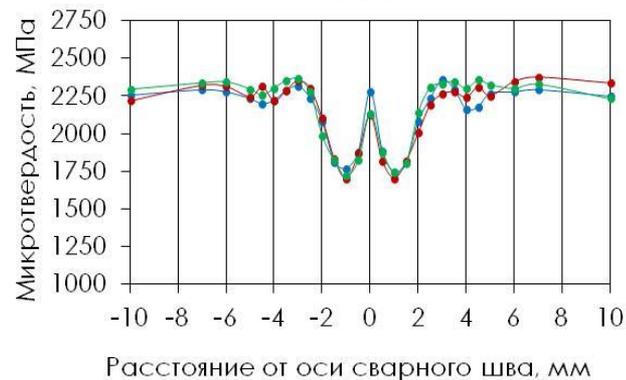
Распределение микротвердости в сварных соединениях



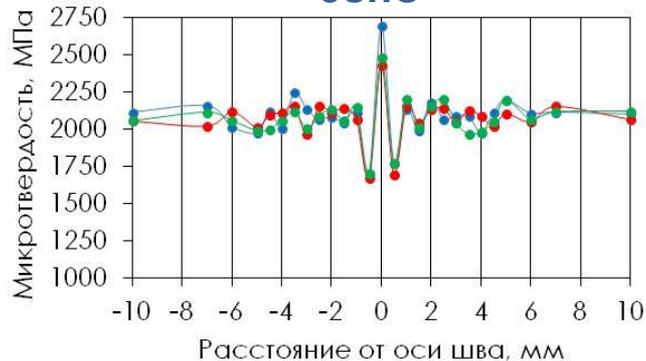
МГТУ

МАГНИТОГОРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Г. И. НОСОВА

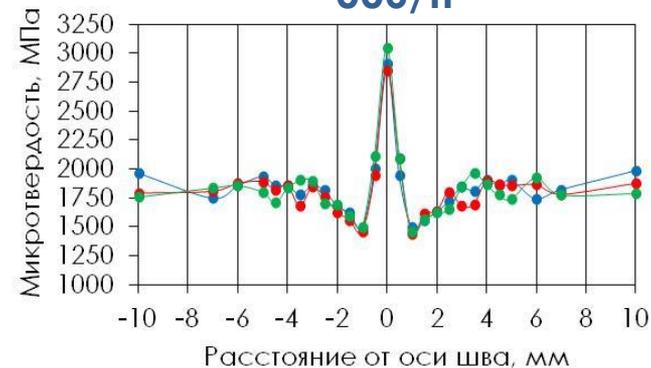
08Ю



08пс



006/IF



—●— Ряд 1 —●— Ряд 2 —●— Ряд 3



МГТУ

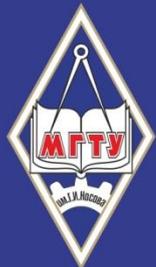
МАГНИТОГОРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Г. И. НОСОВА

1. В лазерных сварных соединениях полос из сталей 08пс, 10пс, 08Ю и 006/IF наблюдаются следующие кристаллические зоны: зона кристаллизации шва со структурой квазиполигонального феррита и реечного бейнита, зона перегрева с крупными ферритными зёрнами, зона перекристаллизации с разнотельной ферритной структурой, зона рекристаллизации с рекристаллизованными и деформированными зёрнами феррита и зона основного металла со структурой, характерной для холоднодеформированной низкоуглеродистой стали. В микроструктуре всех кристаллических зон, кроме зоны кристаллизации шва, также наблюдается небольшое количество «островков» тонкодисперсного перлита.

2. Зона перекристаллизации состоит из двух участков: зоны полной перекристаллизации (нормализации), металл которой нагревается до температуры незначительно выше температуры A_{C3} (приблизительно до 900-1000 °С), состоящей из мелких перекристаллизовавшихся ферритных зёрен и зоны частичной перекристаллизации. В ней металл нагревается до температуры в интервале $A_{C1}-A_{C3}$, что приводит к образованию смеси мелких перекристаллизовавшихся и крупных рекристаллизованных ферритных зёрен. Эта зона является наиболее опасным участком из-за своего разнотельного строения и нестабильных механических свойств, и при прохождении полосы через линию непрерывного агрегата именно в ней может произойти обрыв.

3. Распределение микротвёрдости в лазерных сварных соединениях полос из всех исследованных марок стали 08пс, 10пс, 08Ю и 006/IF является симметричным по отношению к оси сварного шва, а также практически одинаково в центральной и кромочной её части.

4. Для всех сталей строение кристаллических зон лазерных сварных соединений полос морфологически одинаково, а их протяжённость, распределение микротвёрдости и протяжённость области разупрочнения различаются в зависимости от размерно-марочного сортамента стали и условий сварки



МГТУ

МАГНИТОГОРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Г. И. НОСОВА

5. Максимальное значение микротвердости наблюдается на оси сварного шва в зоне его кристаллизации, что определяется наличием бейнитной структуры и составляет от 2140 до 3040 МПа в зависимости от марки стали, толщины полосы и режима сварки. На некотором расстоянии от оси сварного шва наблюдается снижение твердости, минимальное значение которой соответствует зоне перегрева и составляет от 1390 до 2050 МПа. Разупрочнение лазерных сварных соединений в сталях 10пс, 08пс и 08Ю составляет до 38 %, а в сверхнизкоуглеродистой стали 006/IF - до 15 %.

6. При лазерной сварке холоднокатаной полосы из стали 006/IF происходит полное растворение комплексных частиц нитридов (карбонитридов) титана и ниобия и нитридов (карбонитридов) титана в металле сварочной ванны. При последующем охлаждении эти частицы не выделяются и остаются в твердом растворе металла зоны кристаллизации шва, что приводит к повышению микротвердости в зоне кристаллизации шва сварного соединения стали 006/IF примерно на 500 HV по сравнению с микротвердостью стали 08Ю.

7. В участке околошовной зоны сварного соединения полосы из стали 006/IF, прилегающей к зоне кристаллизации шва, образуются аномально крупные зерна феррита, ориентированные в направлении теплоотвода, что может быть объяснено замедлением выделения растворившихся в этой зоне частиц, из-за высоких скоростей охлаждения, характерных для лазерной сварки.

8. Протяженность зоны перекристаллизации сварного соединения из стали 006/IF составляет приблизительно 0,06 мм, что объясняется малым временем пребывания металла в этой зоне при температуре выше A_{C3} из-за больших скоростей теплоотвода в околошовную зону в процессе лазерной сварки.

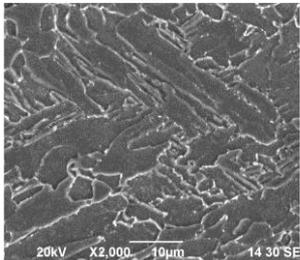


МГТУ

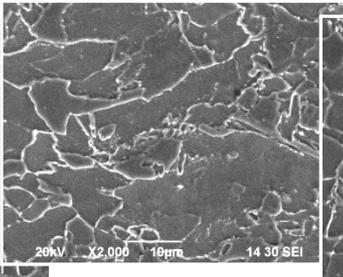
МАГНИТОГОРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Г. И. НОСОВА

Микроструктура и свойства лазерных сварных соединений 26 после рекристаллизационного отжига полосы из стали 08пс

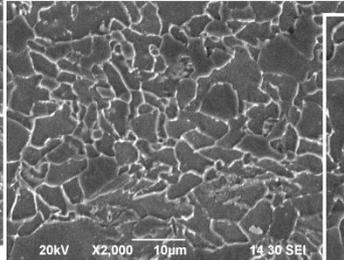
зона кристаллизации шва



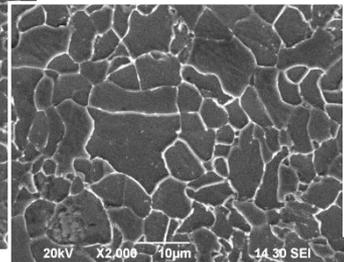
зона перегрева



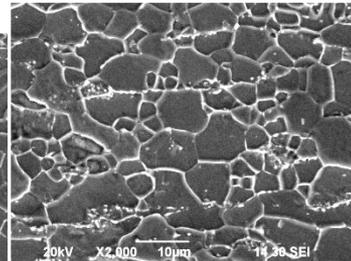
зона нормализации



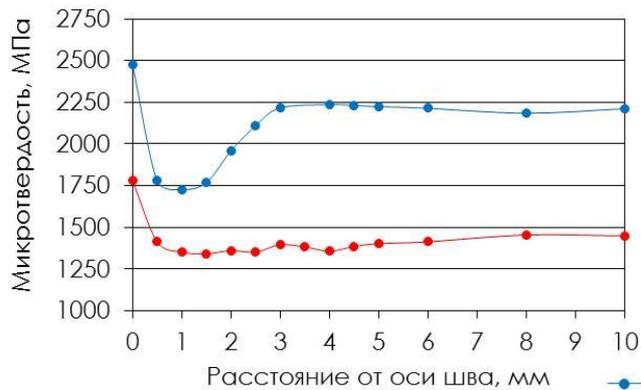
зона частичной перекристаллизации



зона рекристаллизации

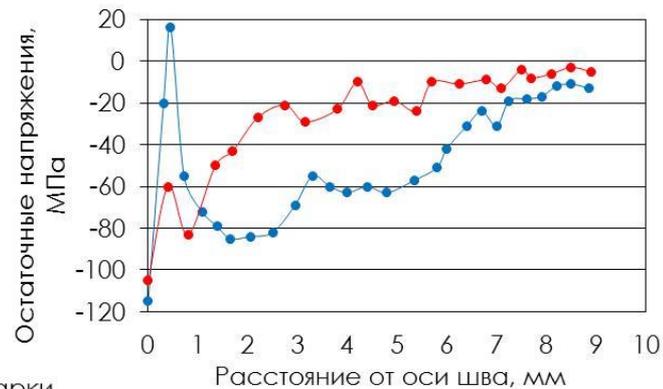


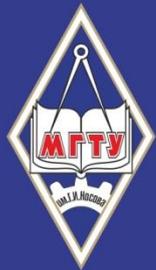
Распределение микротвердости



—●— после лазерной сварки
—●— после отжига

Остаточные напряжения



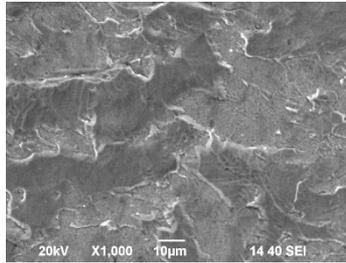


МГТУ

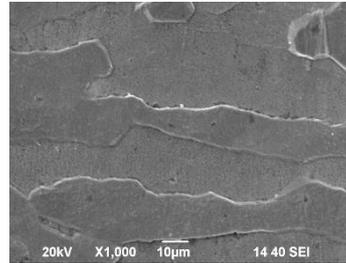
МАГНИТОГОРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Г. И. НОСОВА

Микроструктура и свойства лазерных сварных соединений 27 после рекристаллизационного отжига полосы из стали 006/IF

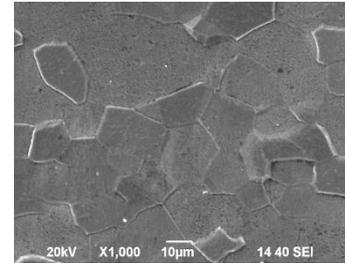
зона кристаллизации
шва



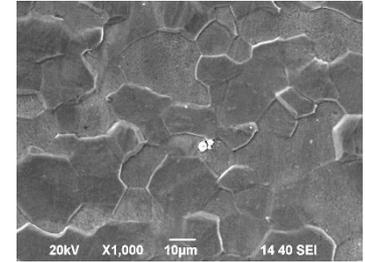
зона перегрева



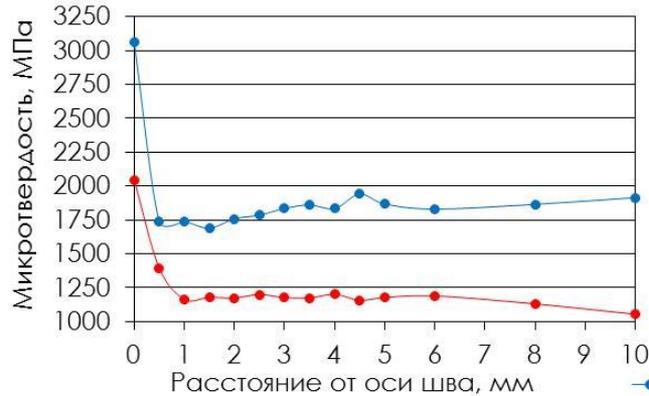
зона
перекристаллизации



зона
рекристаллизации

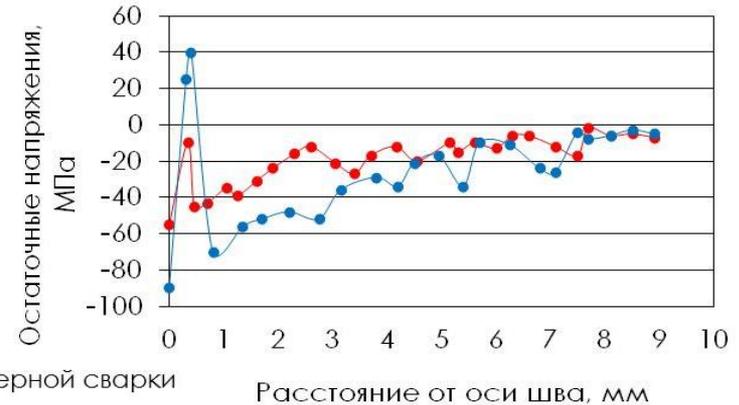


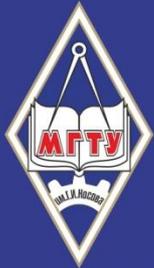
Распределение микротвердости



—●— после лазерной сварки
—●— после отжига

Остаточные напряжения





МГТУ

МАГНИТОГОРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Г. И. НОСОВА

1. Рекристаллизационный отжиг непрерывных полос с лазерными сварными соединениями из сталей 08пс, 10пс, 08Ю и 006/IF в линии непрерывного агрегата АНО/АНГЦ снижает микротвердость и величину остаточных напряжений, делая их распределение более однородным. При этом зона рекристаллизации объединяется с основным рекристаллизованным металлом, вследствие чего протяженность области разупрочнения уменьшается на величину протяженности зоны рекристаллизации.

2. Рекомендованы основные параметры лазерной сварки полосы из стали марок 08пс, 10пс, 08Ю и 006/IF (мощность лазера, скорость сварки, расстояние расфокусировки, а также мощности предварительного и последующего нагревов), обеспечивающие получение сварного соединения с наименьшей протяженностью области разупрочнения и исключающие обрыв полосы при транспортировке в линиях непрерывных агрегатов. Результаты работы использованы при адаптации режимов лазерной сварки холоднокатаной полосы различного размерно-марочного сортамента в линиях непрерывных агрегатов комплекса холодной прокатки ЛПЦ–11 ММК