

УДК 621.375.826

ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА СОВМЕЩЁННЫМИ ТЕПЛОВЫМИ ИСТОЧНИКАМИ

Самарин Пётр Евгеньевич⁽¹⁾, Макаров Валерий Викторович⁽¹⁾, Аунг Лин Хтет⁽²⁾

*Студенты 6 курса⁽¹⁾, магистр 2 года⁽²⁾,
Кафедра МТ-12*

*Московский Государственный Технический Университет имени Н. Э.
Баумана*

*Научный руководитель: А. И. Мисюров,
Кандидат технических наук, доцент кафедры МТ-12*

Применение лазерного излучения для сварки металлов позволяет значительно расширить технологические возможности сварочных процессов, повысить их производительность и улучшить качество сварных соединений. Использование дополнительного теплового источника позволяет повысить эффективность процесса лазерной сварки. Реализация преимуществ достигается при регулировании взаимного положения тепловых источников, имеющих различную распределённость плотности мощности. Изменение взаимного положения тепловых источников позволяет регулировать тепловую обстановку в свариваемом изделии. Высокая сложность процессов создаёт сложности в выборе оптимальных режимов с использованием технологических экспериментов. Поэтому применение методов компьютерного моделирования позволяет упростить выбор оптимальных параметров обработки. В данной работе мы использовали модель, созданную по нашему техническому заданию в Санкт-Петербургском Государственном Техническом Университете. В программе присутствует база данных по материалам, в которой содержится информация о физических свойствах различных сталей и сплавов и их химическом составе. Имеет возможность быстрого поиска необходимого материала, редактирования имеющихся данных и добавления новых.

В данной работе исследовали влияние теплофизических свойств и толщины свариваемого металла на эффективность процесса гибридной сварки. Для этого сваривали сталь 30ХГСА ($\lambda_r = 0,32$ Вт/(см·К)) сталь типа Х18Н9 ($\lambda_r = 0,163$ Вт/(см·К)) различной толщины: 0,6 и 100 мм.

На первом этапе расчет и проводили для случая сварки стали 30ХГСА толщиной 0,6 мм. Изменяли мощность дополнительного источника тепла и его положение относительно центра лазерного луча при условии полного провара пластины.

Установлено, что полное проплавление лазерным лучом достигается при его мощности 1,3 кВт. За счет использования дополнительного источника тепла можно уменьшить мощность лазерного излучения. Расчет проводили для мощности дополнительного источника 2,4,6 и 8 кВт. Результаты показаны на рисунке 1.

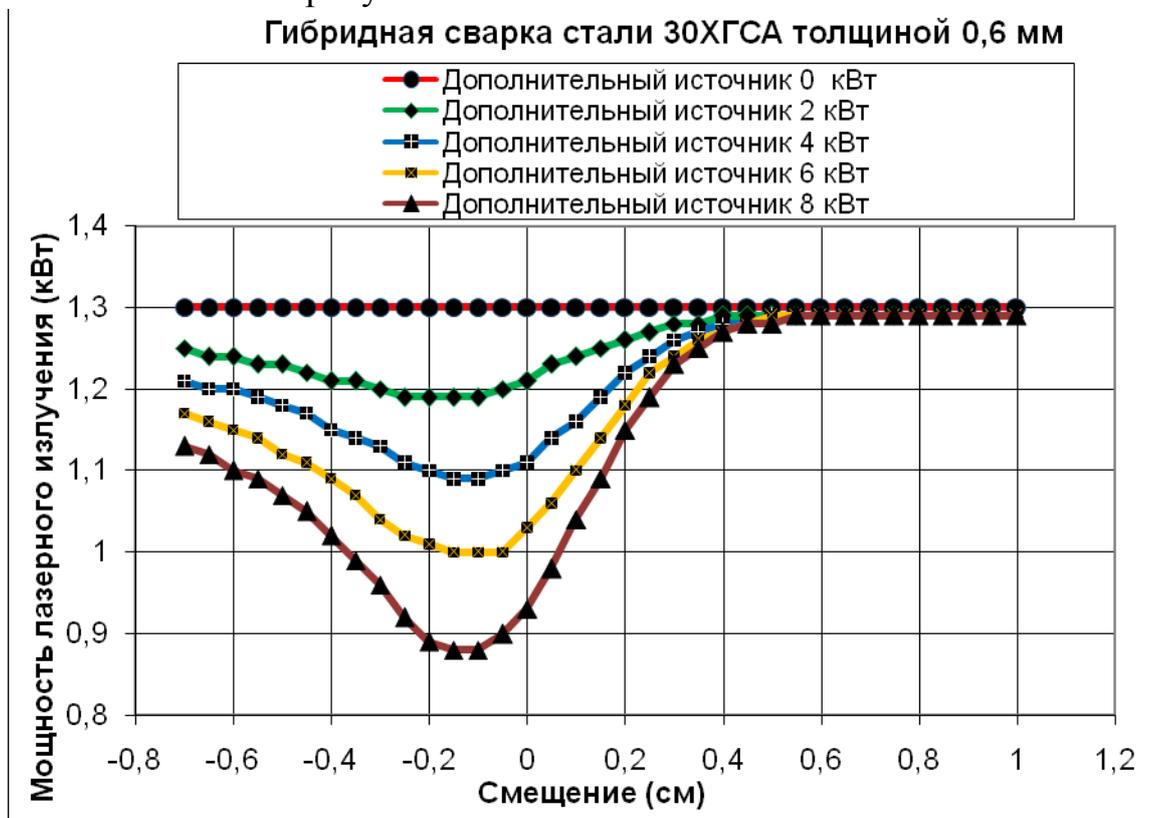


Рис.1. Зависимость мощности лазерного излучения от смещения дополнительного источника при условии полного проплава пластины из стали 30ХГСА.

Изменение положения центра дополнительного источника тепла относительно центра лазерного луча приводит к уменьшению мощности лазерного излучения, необходимой для полного проплавления. Для разных мощностей дополнительного источника максимальное уменьшение мощности лазерного излучения достигается при различных смещениях, однако, имеется тенденция к расположению дополнительного источника спереди от лазерного луча.

Таблица 1. Минимальная мощность лазерного излучения, необходимая для полного проплавления при различных мощностях дополнительного источника (сталь 30ХГСА толщиной 0,6 мм)

Мощность дополнительного источника, кВт	Мощность лазера, кВт
0	1,3
2	1,19
4	1,09
6	1
8	0,88

Таким образом, за счет использования дополнительного источника можно уменьшить мощность лазерного излучения на 32 %.

$$\varepsilon = \frac{P_{\text{Л}}^{\text{max}} - P_{\text{Л}}^{\text{min}}}{P_{\text{Л}}^{\text{max}}} = \frac{1,3 - 0,88}{1,3} = 32 \%$$

На втором этапе расчет проводили для случая сварки стали 30ХГСА толщиной 100 мм. Изменяли мощность дополнительного источника тепла и его положение относительно центра лазерного луча при условии полного проплавления пластины. Установлено, что при мощности 6,86 кВт глубина проплавления составляет 0,78 см.

Увеличение мощности дополнительного источника тепла позволяет уменьшать мощность лазерного излучения при сохранении полного проплава.

Таблица 2. Минимальная мощность лазерного излучения, необходимая для полного проплавления при различных мощностях дополнительного источника (сталь 30ХГСА толщиной 100 мм)

Мощность дополнительного источника, кВт	Мощность лазера, кВт
0	6,86
2	6,81
4	6,76
6	6,7
8	6,64

Таким образом, за счет использования дополнительного источника можно уменьшить мощность лазерного излучения на 3,2 %.

$$\varepsilon = \frac{P_{\text{Л}}^{\text{max}} - P_{\text{Л}}^{\text{min}}}{P_{\text{Л}}^{\text{max}}} = \frac{6,86 - 6,64}{6,86} = 3,2 \%$$

На основании полученных результатов установлено, что применение дополнительного источника на толщине 0,6 мм позволяет уменьшить мощность лазерного излучения на 32%, а на толщине 100 мм только на 3,2 %.

Таким образом использование дополнительного источника наиболее эффективно при гибридной сварке тонколистовых изделий из стали 30ХГСА.

Далее рассмотрим сварку стали типа Х18Н9, имеющую более низкий коэффициент теплопроводности по сравнению с 30ХГСА.

Сначала проводили расчёт для толщины 0,6 мм., изменяя мощность дополнительного источника также как и для стали 30ХГСА.

Установлено, что полное проплавление лазерным лучом достигается при его мощности 1,03 кВт. За счет использования дополнительного источника тепла можно уменьшить мощность лазерного излучения. Расчет проводили для мощности дополнительного источника 2,4,6 и 8 кВт. Результаты показаны на рисунке 2.

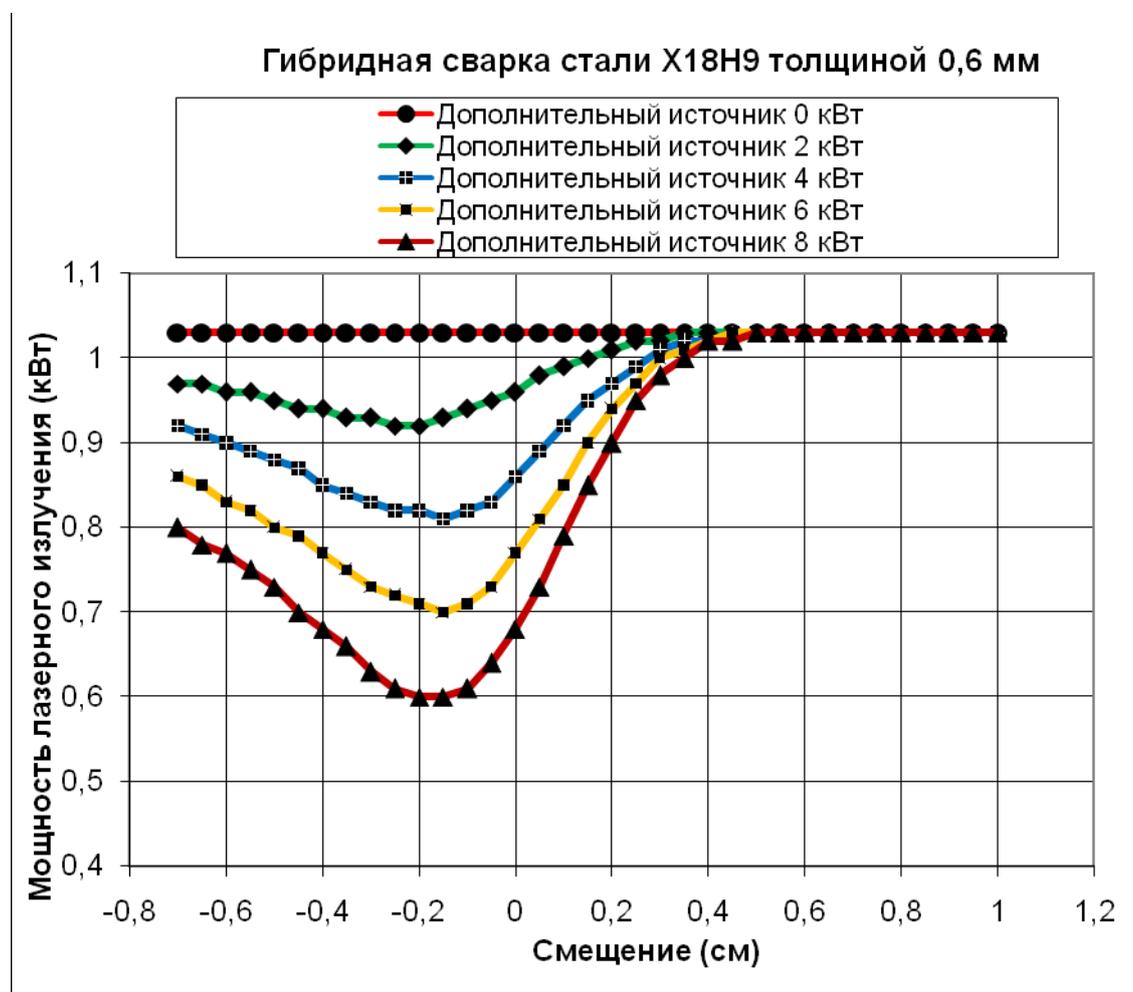


Рис.2. Зависимость мощности лазерного излучения от смещения дополнительного источника при условии полного проплава пластины из стали 30ХГСА.

Изменение положения центра дополнительного источника тепла относительно центра лазерного луча приводит к уменьшению мощности лазерного излучения, необходимой для полного проплавления. Для разных мощностей дополнительного источника максимальное уменьшение

мощности лазерного излучения достигается при различных смещениях, однако, имеется тенденция к расположению дополнительного источника спереди от лазерного луча.

Таблица 3. Минимальная мощность лазерного излучения, необходимая для полного проплавления при различных мощностях дополнительного источника (сталь X18H9, толщиной 0,6 мм)

Мощность дополнительного источника, кВт	Мощность лазера, кВт
0	1,03
2	0,92
4	0,81
6	0,7
8	0,6

Таким образом, за счет использования дополнительного источника можно уменьшить мощность лазерного излучения на 42 %.

$$\Theta = \frac{P_{\text{Л}}^{\text{max}} - P_{\text{Л}}^{\text{min}}}{P_{\text{Л}}^{\text{max}}} = \frac{1,03 - 0,6}{1,03} = 42 \%$$

Рассмотрим теперь сварку стали X18H9 толщиной 100 мм.

Установлено, что при мощности 6,94 кВт глубина проплавления составляет 0,63 см.

Увеличение мощности дополнительного источника тепла позволяет уменьшать мощность лазерного излучения при сохранении полного проплава.

Таблица 2. Минимальная мощность лазерного излучения, необходимая для полного проплавления при различных мощностях дополнительного источника (сталь X18H9 толщиной 100 мм)

Мощность дополнительного источника, кВт	Мощность лазера, кВт
0	6,94
2	6,86
4	6,79
6	6,72
8	6,65

$$\text{Эффективность } \Theta = \frac{P_{\text{Л}}^{\text{max}} - P_{\text{Л}}^{\text{min}}}{P_{\text{Л}}^{\text{max}}} = \frac{6,94 - 6,65}{6,94} = 4,2 \%$$

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что уменьшение теплопроводности приводит к увеличению эффективности на 24 %.

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} = \frac{42 - 32}{42} = 24 \%$$

Наряду с изменением эффективности, при использовании дополнительного источника тепла возможно регулирование тепловой обстановки при сварке. Это особо важно при сварке закаливающих сталей, в которых при лазерном воздействии происходит образование хрупких структур.

При изменении параметров сварочного термического цикла можно добиться благоприятной структуры сварного соединения. Расчёты показывают, что использование дополнительного источника способствует снижению скорости охлаждения $\omega_{700-800}$ и увеличению времени пребывания при $t=800-500^{\circ}\text{C}$. Это должно привести к увеличению пластичности сварного соединения за счёт изменения структуры.

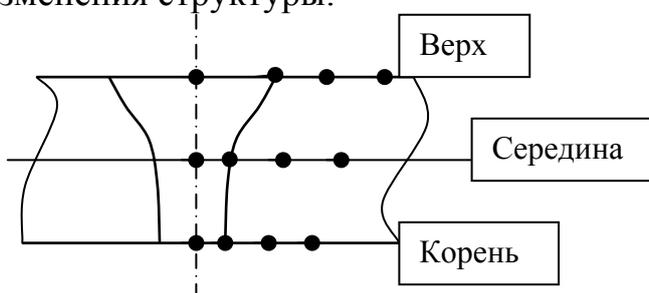


Рис. 3. Точки шва, в которых рассчитывалось время пребывания металла при температурах 800-500⁰С

Расчет проводился в трех сечениях: на верхней кромке, в середине и корне шва (рис. 3) по мере удаления от его центра вплоть до зоны, нагревающейся ниже температуры 800°C .

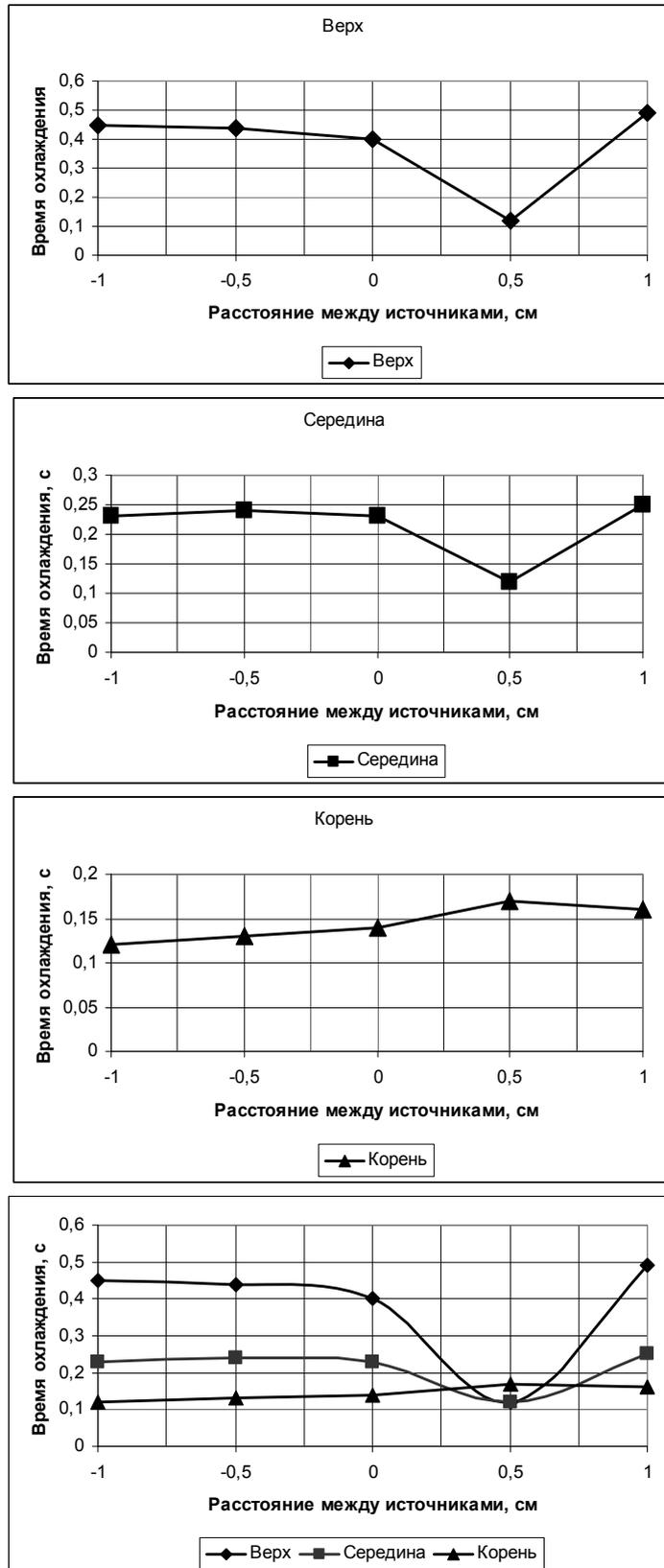


Рис. 4. Зависимость времени охлаждения от расстояния между источниками при сварке совмещенными источниками стали типа 30ХГСА.

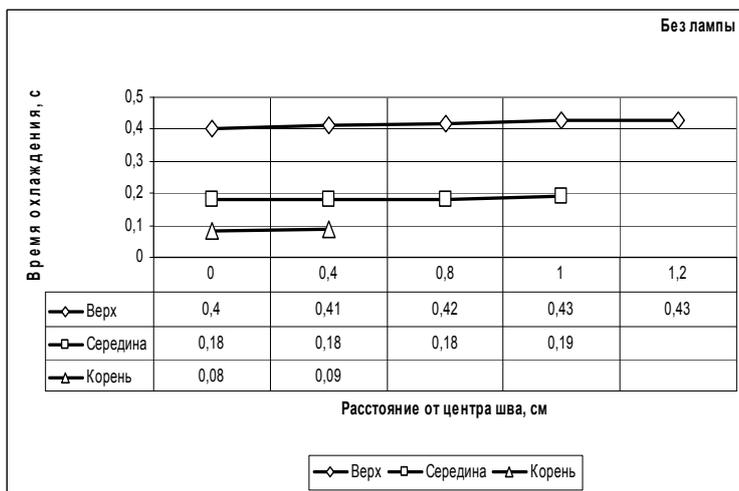
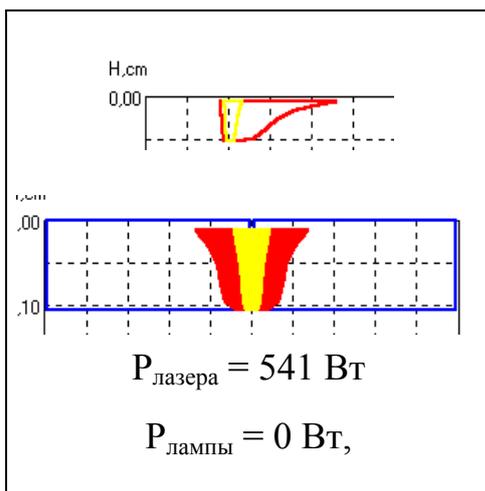


Рис. 5. Форма шва в продольном и поперечном сечениях и скорости охлаждения на верхней кромке, в середине и корне шва для режимов сварки без дополнительного источника.

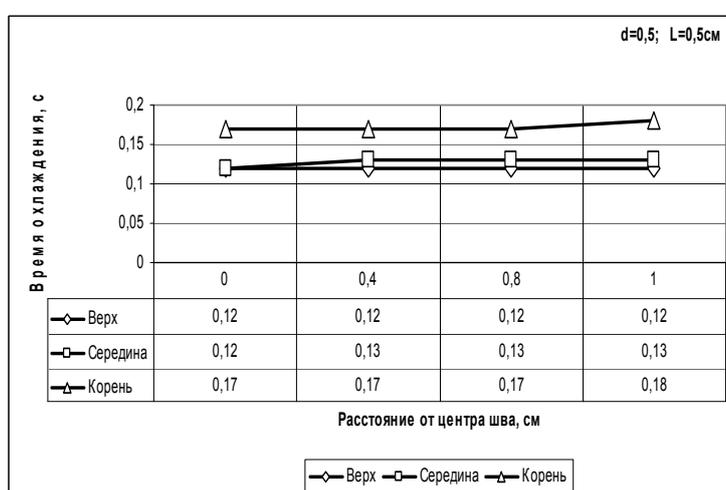
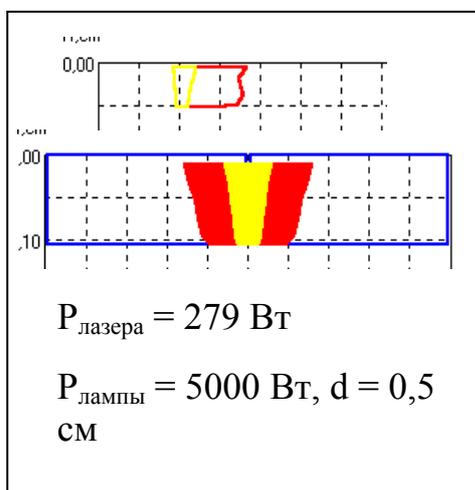


Рис. 6. Максимальный синергетический эффект. Форма шва в продольном и поперечном сечениях и скорости охлаждения на верхней кромке, в середине и корне шва для «характерных» режимов сварки совмещенными источниками.

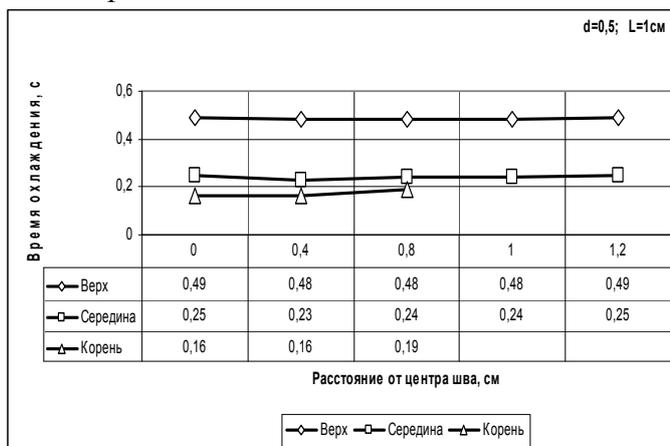
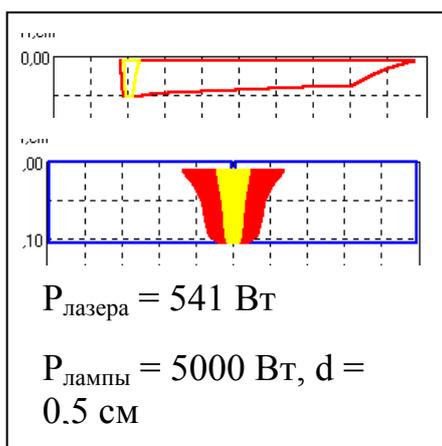


Рис. 7. Минимальная скорость охлаждения. Форма шва в продольном и поперечном сечениях и скорости охлаждения на верхней кромке, в середине и корне шва для «характерных» режимов сварки совмещенными источниками

Анализ расчетных данных показал, что по глубине сварного соединения время пребывания металла при температурах 800-500⁰С, а, следовательно, и скорость охлаждения крайне неравномерны. Наблюдается возрастание скорости охлаждения при переходе от верхней кромки к нижней, корневой части. В условиях полного проплавления пластины при лазерной сварке по сравнению с гибридной, в корневой части сварного соединения время пребывания металла при температурах 800-500⁰С имеет наименьшую величину (рис. 7). Результаты показывают, что за счет введения дополнительного источника можно увеличить это время. Однако на режимах лазерно-световой сварки, при которых наблюдается максимальная эффективность лазерного излучения с точки зрения проплавляющей способности, время пребывания меньше, а значит и скорость охлаждения выше. Это видно из сравнения рисунков рис. 6 и 7. Таким образом, расчеты показывают, что режимы, на которых достигается максимальная эффективность лазерного воздействия, не совпадают с режимами, на которых скорость охлаждения минимальна.

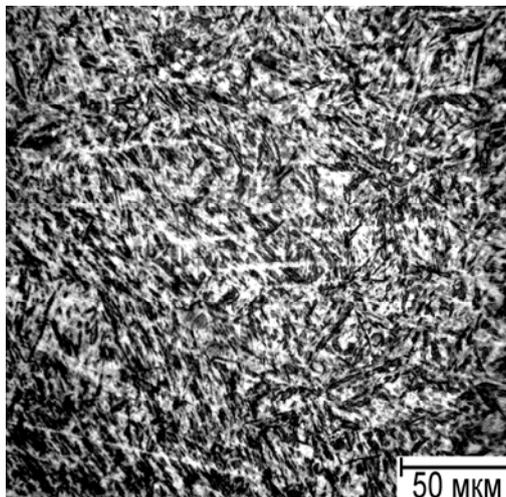


Рис. 8. Мартенситно-бейнитная структура металла шва стали 30ХГСА, возникающая при лазерной сварке.

После проведенного металлографического исследования было установлено, что при лазерной сварке стали 30ХГСА за счет высоких скоростей охлаждения в металле шва образуется крупноигльчатая структура, состоящая в основном из мартенсита (М) и бейнита (Б). Полученные значения микротвердости HV_{005} 650 – 450 соответствуют этим структурам (рис. 8), а процентное соотношение фаз в сварном шве составляет мартенсит - 97% - 95% , бейнит 3% - 5%. Такая структура мало пластична и склонна к трещинообразованию.

При гибридном способе сварки происходит снижение скорости охлаждения и структура шва состоит из троосто-бейнита (рис. 9).

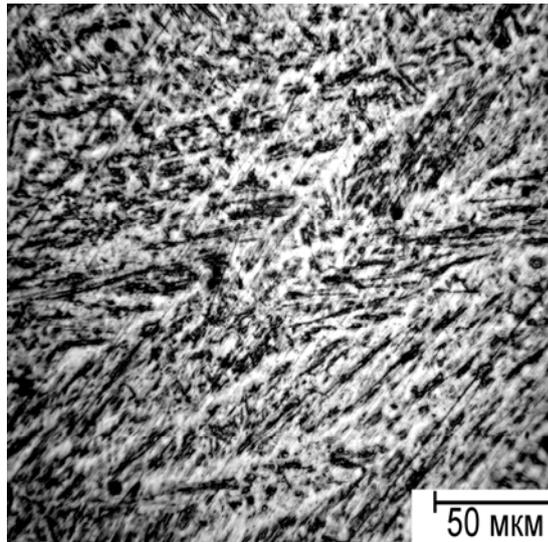


Рис. 9. Бейнитно-трооститная структура металла шва стали 30ХГСА, возникающая при гибридной лазерной сварке.

Микротвердость шва находится в пределах HV_{005} 335-540. Процентное соотношение фаз в шве составляет бейнит 85% - 90%, троостит 10% - 15%. Образование в структуре шва троосто-бейнита приводит к снижению вероятности образования трещин.