

## СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКИ СКАНИРУЮЩЕЙ ПЛАЗМЕННОЙ ДУГОЙ

Трекин Григорий Евгеньевич, лаборант-исследователь, канд. техн. наук, доц.  
Сафонов Евгений Николаевич, д-р техн. наук, ст. науч. сотрудник  
E-mail: [g.e.trekin@urfu.ru](mailto:g.e.trekin@urfu.ru)

НТИ (филиал) УрФУ  
г. Нижний Тагил, РФ

**Аннотация.** Применение аналитических методик при расчетах термических процессов плазменной поверхностной обработки оправдано с точки зрения временных затрат и их относительной простоты, а также возможности применения инженерного программного обеспечения. С применением программной среды *Mathcad 14* в работе проанализированы температурные поля, полученные по четырем расчетным моделям подвижных источников теплоты на поверхности полубесконечного тела, различающиеся схемой источников теплоты, моделирующих сканирующую плазменную дугу. Проведенное сравнение показало, что для предварительных расчетов сечения закаленной зоны предпочтительно использование моделей составного нормально-распределенного источника теплоты, имитирующего синусоидальные колебания плазменной дуги, а также одного нормально-распределенного источника теплоты, совершающего синусоидальные колебания.

**Ключевые слова.** Плазменная закалка, сканирующая плазменная дуга, расчеты температуры, тепловые процессы, круговой нормально-распределенный источник.

Расчеты тепловых процессов для движущихся концентрированных источников по инженерным аналитическим методикам используются для предварительного определения параметров технологических режимов и результатов обработки, а также при выборе вариантов для численного более ресурсоемкого расчета. При поверхностной закалке сканирующей плазменной дугой может применяться несколько моделей расчета тепловых процессов. В качестве модели закаливаемой детали обычно используется полубесконечное тело, поскольку чаще всего обработке подвергаются достаточно массивные заготовки, обеспечивающие закалку за счет теплоотвода в их внутренние подповерхностные объемы. Для модели подвижных источников теплоты используются:

- горизонтально лежащий линейный источник (рис. 1, а);
- нормально полосовой источник – при сканировании синусоидальным сигналом выстроенные в линию поперек скорости движения нормально круговые источники с мощностью, меняющейся пропорционально времени нахождения дуги над данным участком, а их коэффициент сосредоточенности меняется с изменением длины дуги (сформированный из 5 источников представлен на рис. 1, б);
- нормально полосовой источник – при сканировании пилообразным сигналом (сформированный из 5 нормально круговых равной мощности с меняющимся коэффициентом сосредоточенности в зависимости от длины дуги, представлен на рис. 1, в);
- нормально круговой источник, совершающий синусоидальные колебания поперек скорости движения (рис. 1, г).

Для расчета использованы применявшиеся на практике режимы закалки: сила тока плазменной дуги  $I = 240$  А; напряжение  $U = 48,5$  В; скорость движения дуги  $V = 3,0$  см/с; колебания дуги синусоидальные частотой 50 Гц с амплитудой 10 мм.

Коэффициент полезного действия дуги принят равным 0,55, согласно рекомендациям работы [1]. Коэффициенты сосредоточенности рассчитывались по данным работ [2, 3]. Теплофизические свойства для среднего химического состава стали 30ХНМА рассчитывались по методике работы [4], температура превращения по [5]. Расчет осуществлялся в программной среде *Mathcad 14* по формулам из работы [6] для нормально-кругового ис-

точника (из совокупности таких также формировались и составные источники), линейного лежачего источника и нормально-кругового, совершающего синусоидальные колебания поперек скорости перемещения.

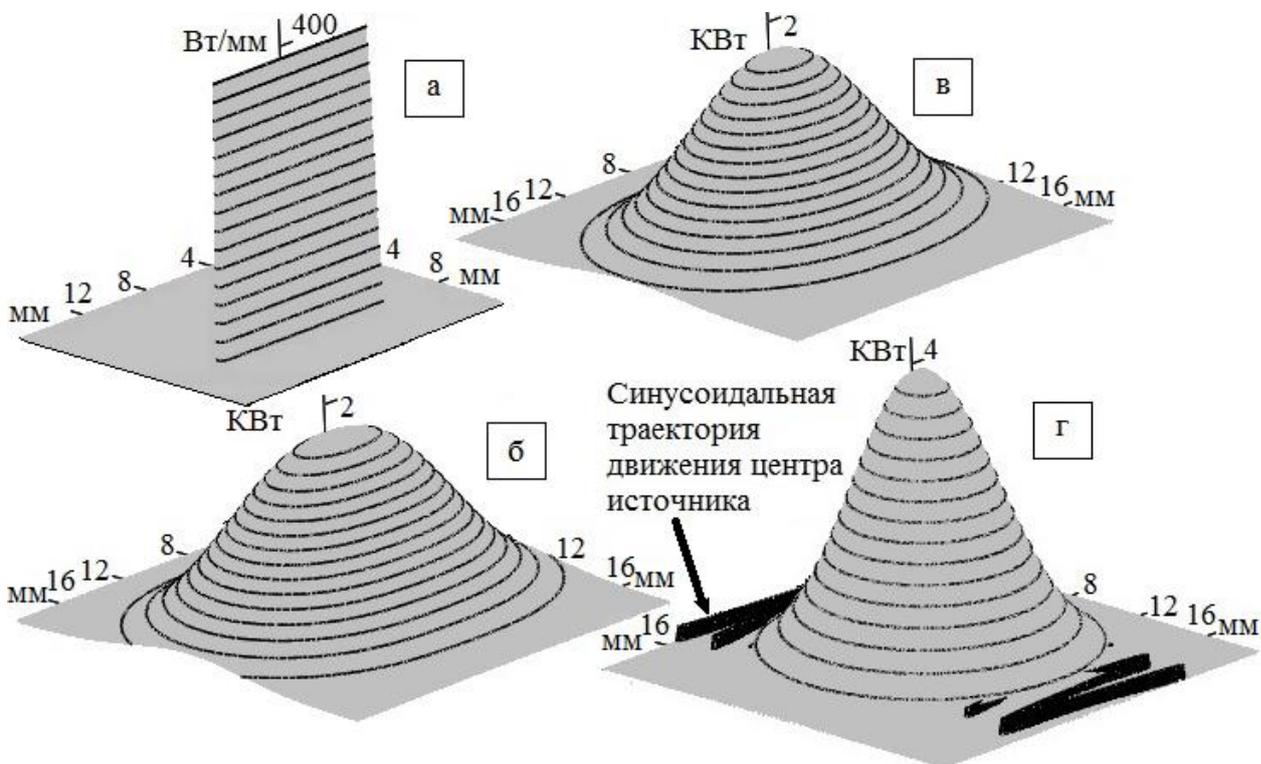


Рис. 1. Расчетные распределения мощности источников теплоты:

- a* – для линейного лежачего источника теплоты; *б* – для составного источника, имитирующего синусоидальные колебания; *в* – для составного источника, имитирующего пилообразные колебания; *г* – для нормально-распределенного источника, совершающего синусоидальные колебания

Результаты расчетов представлены на рис. 2 и 3. Сравнение моделей источников показывает, что ключевую роль в формировании температурного поля обрабатываемой детали играет плотность распределения энергии в пятне нагрева. При максимальной концентрации энергии размеры зоны нагрева выше температуры превращения  $A_{c3}$ , максимальны у линейного лежачего источника. При синусоидальных колебаниях источника с меньшей плотностью энергии зона нагрева сокращается и при минимальной плотности за счет распределения энергии вдоль линии объем прогрева заготовки минимален. Несмотря на различия в объеме прогретого металла, геометрические размеры поперечного сечения зоны нагрева у распределенных вдоль линии источников и у синусоидально колеблющегося достаточно близки, что позволяет использовать эти модели для определения размеров упрочненного слоя при поверхностной закалке. Для расчетного определения структуры и твердости зоны закалки использовать составные вдоль линии источники можно будет ограничено, поскольку время пребывания в температурном интервале превращения сильно сокращено.

Использование линейного лежачего источника теплоты для поверхностной плазменной обработки не применимо из-за завышенных размеров зоны нагрева. Глубина зоны нагрева близка к реальной для составного источника, имитирующего синусоидальные колебания и для одного источника, совершающего синусоидальные колебания. Ширина зоны нагрева с реальной не совпадает.

Таким образом, сравнение расчетных моделей поверхностной плазменной обработки, различающихся применяемым источником теплоты, показало, что применение кон-

центрированных источников дает завышенные размеры зоны нагрева. Применение нормально-распределенных источников позволяет более адекватно определять температурные поля в обрабатываемой детали, и они могут быть использованы на практике.

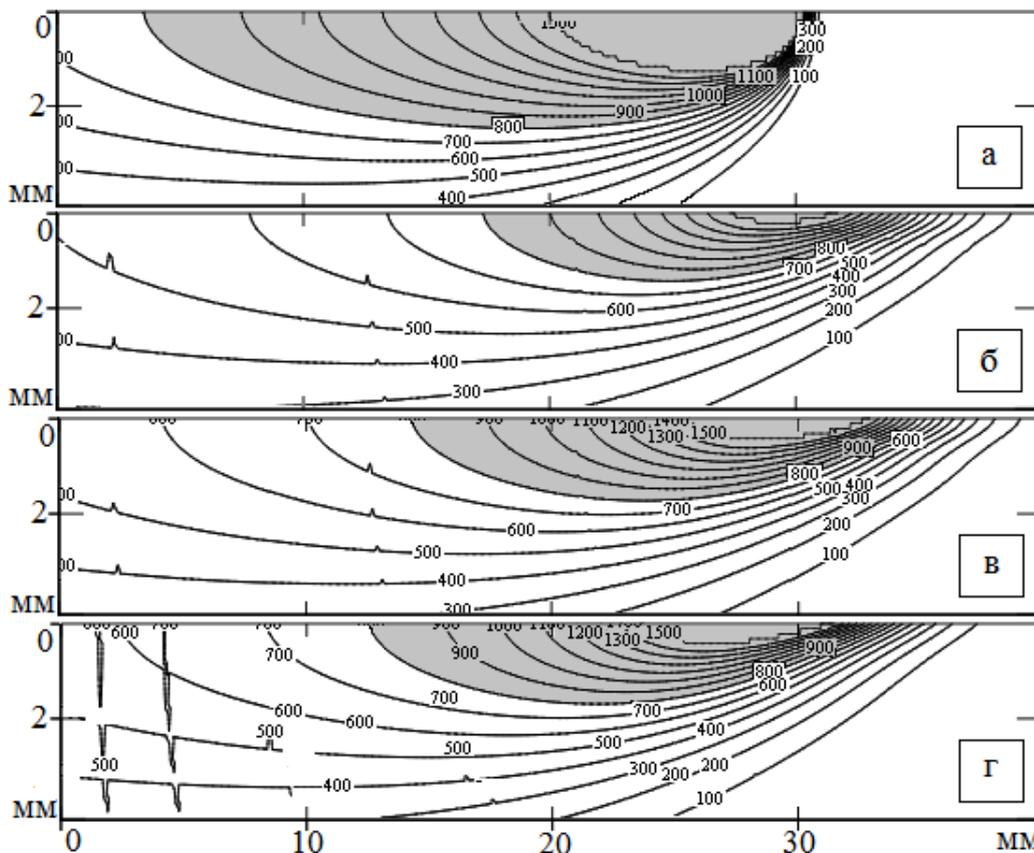


Рис. 2. Расчетное квазистационарное температурное поле в вертикальном сечении по середине источника вдоль траектории перемещения  
а, б, в, г – см. рис. 1 выделена зона нагрева выше  $A_{c3} = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$

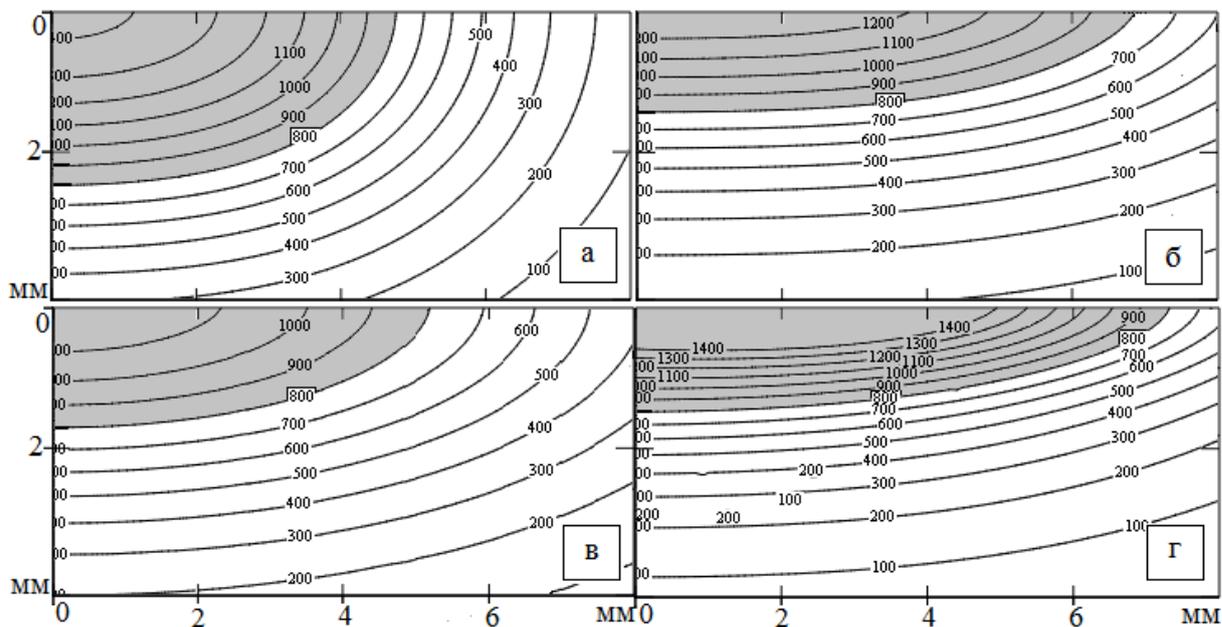


Рис. 3. Расчетное квазистационарное температурное поле в вертикальном сечении поперек траектории движения в сечении с максимальной глубиной изотермы  $A_{c3}$   
а, б, в, г – см. рис. 1 выделена зона нагрева выше  $A_{c3} = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$

## Библиографический список

1. Соснин, Н. А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров / Н. А. Соснин, С. А. Ермаков, П. А. Тополянский. – Санкт Петербург : Издательство политехн. ун-та, 2013. – 406 с.
2. Обработка металлов резанием с плазменным нагревом / А. Н. Резников, М. А. Шатерин, В. С. Кунин, Л. А. Резников ; под общ. ред. А. Н. Резникова. – Москва : Машиностроение, 1986. – 232 с, ил.
3. Поляков, С. П. Плотность тока и потока энергии на анодном пятне аргоновой и азотной дуг. Теплофизика высоких температур / С. П. Поляков, П. Ф. Буланый. – Т. 21, вып. 2, 1983. – С. 246–248.
4. Конищев, Б. П. Расчет теплофизических коэффициентов сталей по их химическому составу и температурной зависимости теплофизических свойств цветных металлов / Б. П. Конищев, К. Б. Конищев // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. Машиностроение и автоматизация. – № 5(102). – с. 31–36.
5. Смирнов, В. А. Основы термической обработки стали : учебное пособие / В. А. Смирнов, В. М. Счастливец, Л. Г. Журавлев / Екатеринбург : УрО РАН, 1999. – С. 496. – ISBN 5-7691-08-48-7.
6. Victor A, Karkhin. Thermal Processes in Welding. Springer Nature Singapore Pte Ltd. – 2019 478 pp. – eBook ISBN 978-981-13-5965-1.