

Лазерная закалка сталей по аналогии с другими видами закалки заключается в формировании на этапе нагрева аустенитной структуры и ее последующем превращении в мартенсит на этапе охлаждения. Появление новейших мощных лазерных источников волоконного типа актуализирует вопрос об эффективности их использования для лазерной закалки. Причем на данные источники нельзя непосредственно переносить результаты, получаемые и при использовании CO<sub>2</sub>-лазеров и при использовании YAG-излучателей. В первом случае мы имеем существенное отличие в длине волны (в десять раз), во втором – сильно различающиеся пространственно-геометрические параметры светового пучка. Таким образом, изучение процесса закалки сталей волоконным лазером представляет особый интерес.

В качестве эксперимента была произведена закалка стального ножа, выполненного из широко распространенной стали 40X13. Закалка производилась импульсным волоконным иттербиевым лазером с длиной волны 1,054 нм. Параметры лазера:

- Средняя мощность  $P = 50 \text{ Вт}$
- Энергия импульса  $W = 1 \text{ мДж}$
- Длительность импульса  $\tau = 300 \text{ нс}$
- Диаметр фокусного пятна  $d = 200 \text{ мкм}$
- Скорость сканирования  $V = 0,2 \text{ м/с}$
- Частота  $f = 50 \text{ кГц}$

Физические характеристики стали 40X13:

- Плотность  $\rho = 7670 \text{ кг/м}^3$
- Теплоемкость  $C = 461 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$
- Теплопроводность  $\lambda = 25 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$

Для расчетного определения рабочих параметров процесса, таких как распределение температуры по глубине, скорости нагрева и охлаждения, расчетная глубина закаленного слоя, нужно решить уравнение теплопроводности. Для этого доопределим необходимые параметры:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} = 7,07 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$$

- температуропроводность материала;

$$h = 2\sqrt{a \cdot \tau} = 1.682 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

- зона термического влияния, на которую распространится тепло за время лазерного воздействия;

$$v = \sqrt{\frac{a}{\tau}} = 0,084 \text{ м/с}$$

- скорость распространения теплового фронта за время лазерного воздействия;

$A = (1 - R) = 0,37$  - коэффициент поверхностного поглощения излучения (R – коэффициент отражения материала);

$$q = \frac{P}{S} = \frac{W}{S \cdot \tau} = 1,592 \cdot 10^9 \text{ Вт/м}^2$$

- плотность мощности лазерного излучения.

Теперь нужно определиться с выбором расчетной модели, установив соотношения между следующими параметрами:

1.  $h \sim r$ , т.е. является ли источник точечным или распределенным.

2.  $v \sim V$ , т.е. является ли источник быстро движущимся;

3.  $h \sim H$ , является ли модель полубесконечной тепловой задачей.

Исходя из этих условий, наша задача определяется, как полубесконечная с быстро движущимся точечным источником. В общем случае решение задачи для непрерывного и импульсного воздействия несколько отличаются. Однако, приняв во внимание, что частота следования

импульсов  $f > \frac{a}{30r^2}$ , где  $r$  - радиус пятна обработки, можно говорить о накоплении в материале тепла от импульса к импульсу, что характерно для воздействия непрерывным источником.

Таким образом, при переходе от импульсного к непрерывному режиму в расчеты необходимо внести следующие корректировки:

Время воздействия излучения меняется с длительности импульса на время, за которое пучок

$$\tau = \frac{d}{V} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ с}$$

проходит свой диаметр .

Теперь воспользуемся формулой, позволяющей получить температуру на глубине  $z$  за время воздействия  $t$ :

$$T(z,t) = \frac{2q(1-R)\sqrt{a\tau}}{\lambda} \text{ierfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{a\tau}}\right),$$

где  $ierfc\left(\frac{z}{2\sqrt{a\tau}}\right)$  – функция кратного интеграла вероятности, определяемая как

$$ierfc(x) = \frac{\exp(-x^2)}{\sqrt{\pi}} - x + x \cdot erf(x) \quad , \quad erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-y^2) dy$$

– функция интеграла вероятности.

Для определения скорости распространения тепла продифференцируем  $T(z,t)$  по  $\tau$ :

$$\frac{\partial T(z,\tau)}{\partial \tau} = v_i = \frac{(1-R)q}{\lambda} \left( \sqrt{\frac{a}{\tau}} ierfc\left[\frac{z}{2\sqrt{a\tau}}\right] + \frac{z}{2\tau} erfc\left[\frac{z}{2\sqrt{a\tau}}\right] \right)$$

Для расчета скорости охлаждения получим выражение для температурного поля после прекращения действия источника теплоты. Проще всего для этих целей пользоваться понятием стока. Под стоком понимают источник теплоты с отрицательной плотностью потока. Использование стока теплоты, сдвинутого относительно источника теплоты на время воздействия  $\tau$ , дает возможность, не решая задачи, записать формулу для температурного поля для моментов времени  $t \geq \tau$ . Тогда для расчета температурного поля полубесконечного тела от действия источника теплоты с постоянной плотностью потока продолжительностью  $\tau$  на стадии остывания получим выражение

$$T(z,t) = \frac{2(1-R)q}{\lambda} \left( \sqrt{at} ierfc\left[\frac{z}{2\sqrt{at}}\right] - \sqrt{a(t-\tau)} ierfc\left[\frac{z}{2\sqrt{a(t-\tau)}}\right] \right)$$

Отсюда скорость охлаждения поверхности после прекращения действия источника тепла выражается как

$$v_c = \frac{(1-R)q}{\lambda} \left( \sqrt{\frac{a}{t}} ierfc\left[\frac{z}{2\sqrt{at}}\right] + \frac{z}{2t} erfc\left[\frac{z}{2\sqrt{at}}\right] - \sqrt{\frac{a}{t-\tau}} ierfc\left[\frac{z}{2\sqrt{a(t-\tau)}}\right] - \frac{z}{2(t-\tau)} erfc\left[\frac{z}{2\sqrt{a(t-\tau)}}\right] \right)$$

Графики зависимостей температур и скоростей нагрева и охлаждения располагаются ниже. Исходя из графика распределения температур при нагреве, и приняв температуру аустенитизации равной  $800\text{ C}^0$  прогнозируемая толщина закаленного слоя составляет примерно 80-90 мкм.

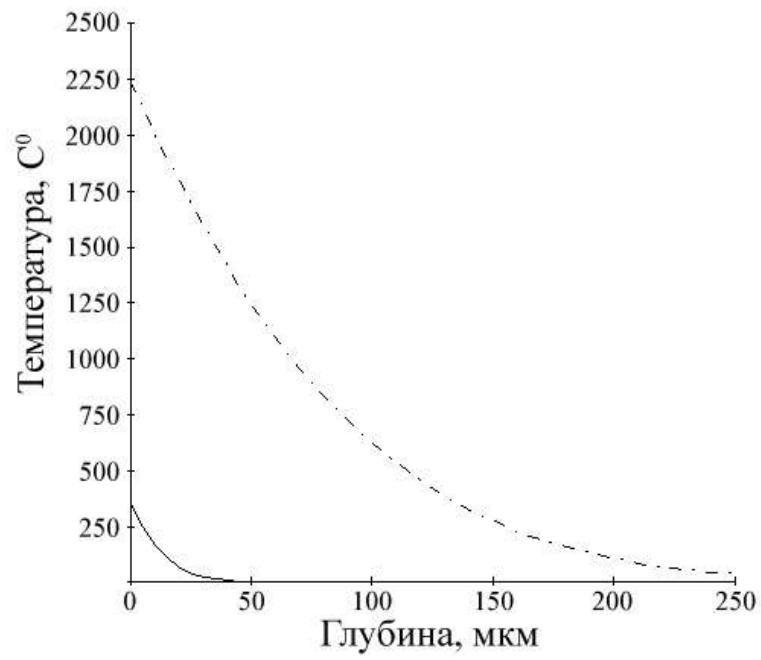


Рис. 3. Зависимость температуры при нагревании от глубины. Сплошной линией указана температура в момент времени  $(t/40)$ , пунктиром – при времени  $t$

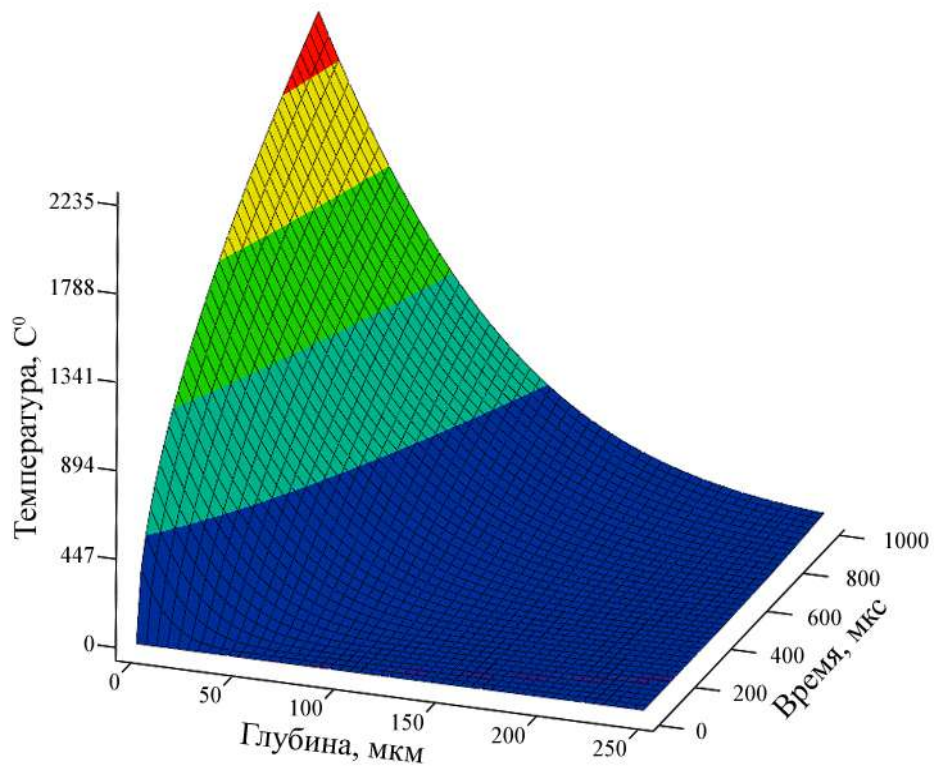


Рис. 4. Распределение температуры при нагревании по времени и глубине.

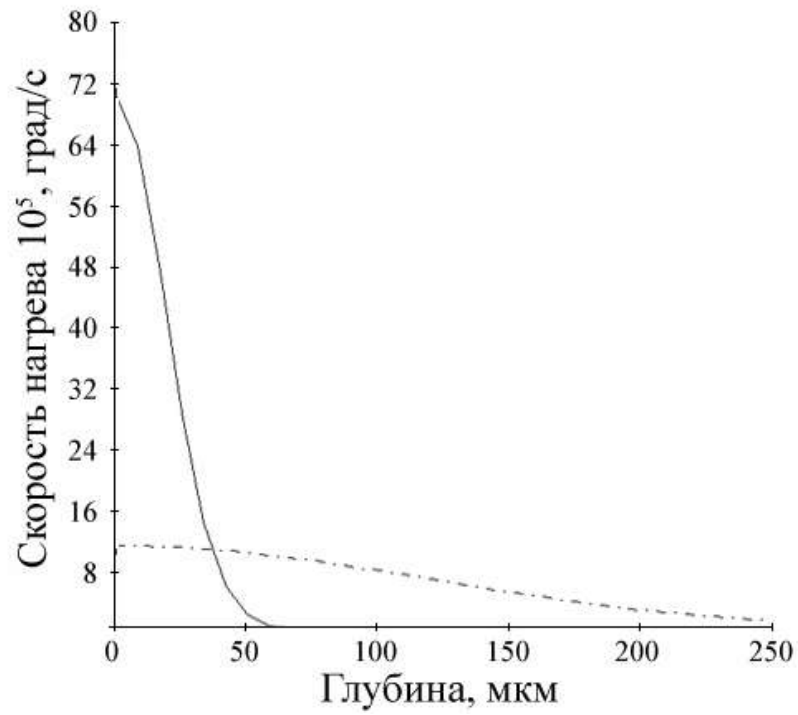


Рис. 5. Зависимость скорости нагрева от глубины. Сплошной линией указана скорость в момент времени  $(t/40)$ , пунктиром – при времени  $t$

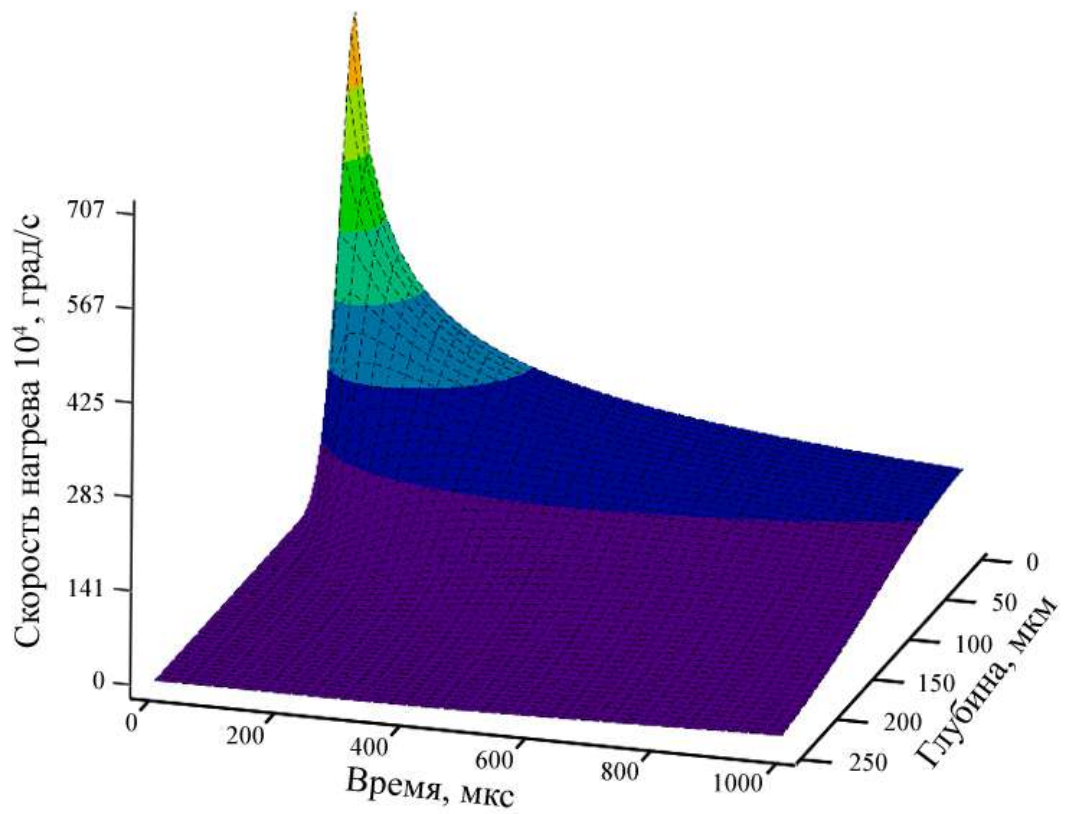


Рис. 6. Распределение скорости нагрева по времени и глубине

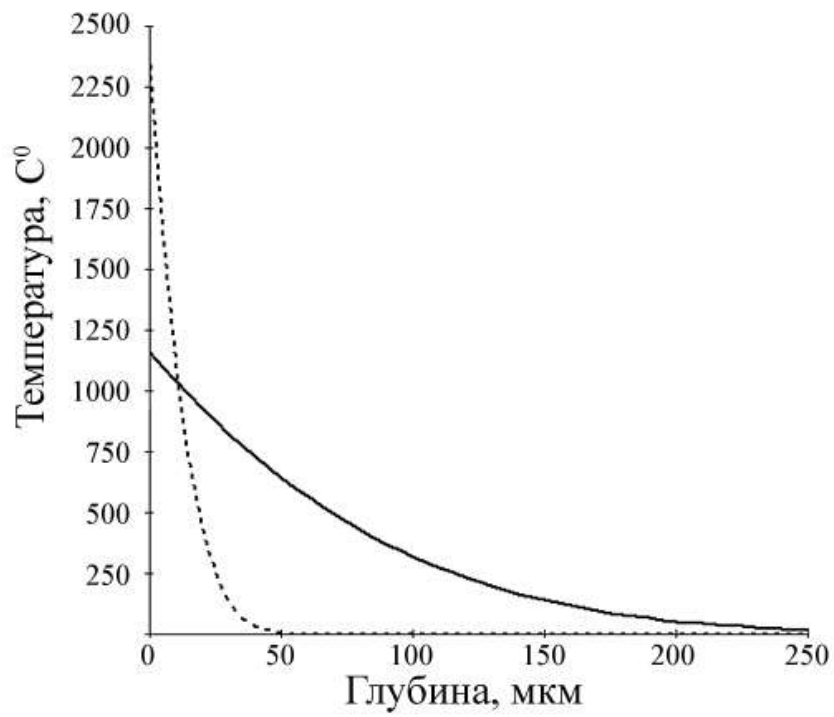


Рис. 7. Зависимость температуры при остывании от глубины. Пунктиром указана температура в момент времени  $(t+t/40)$ , сплошной линией – при времени  $2t$

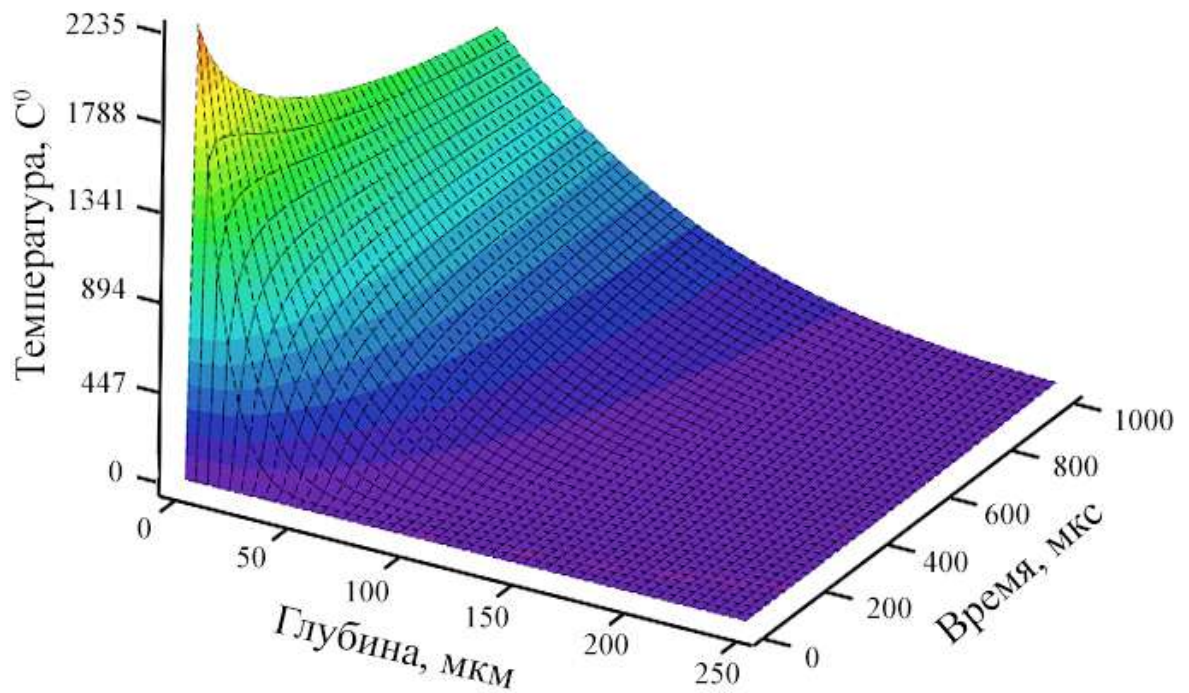


Рис. 8. Распределение температуры при остывании по времени и глубине

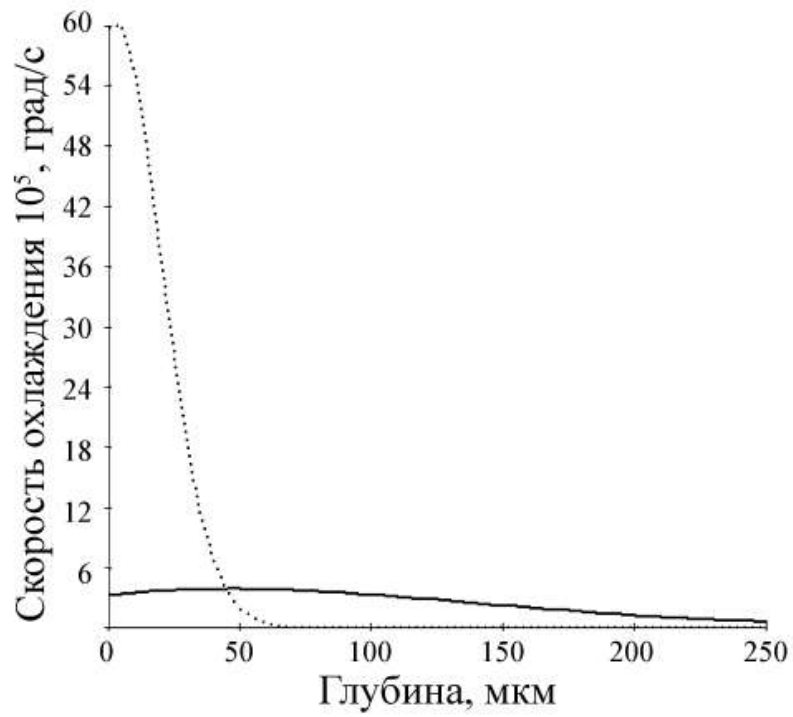


Рис. 9. Зависимость скорости нагрева от глубины. Пунктиром указана скорость в момент времени  $(t+t/40)$ , сплошной линией – при времени  $2t$

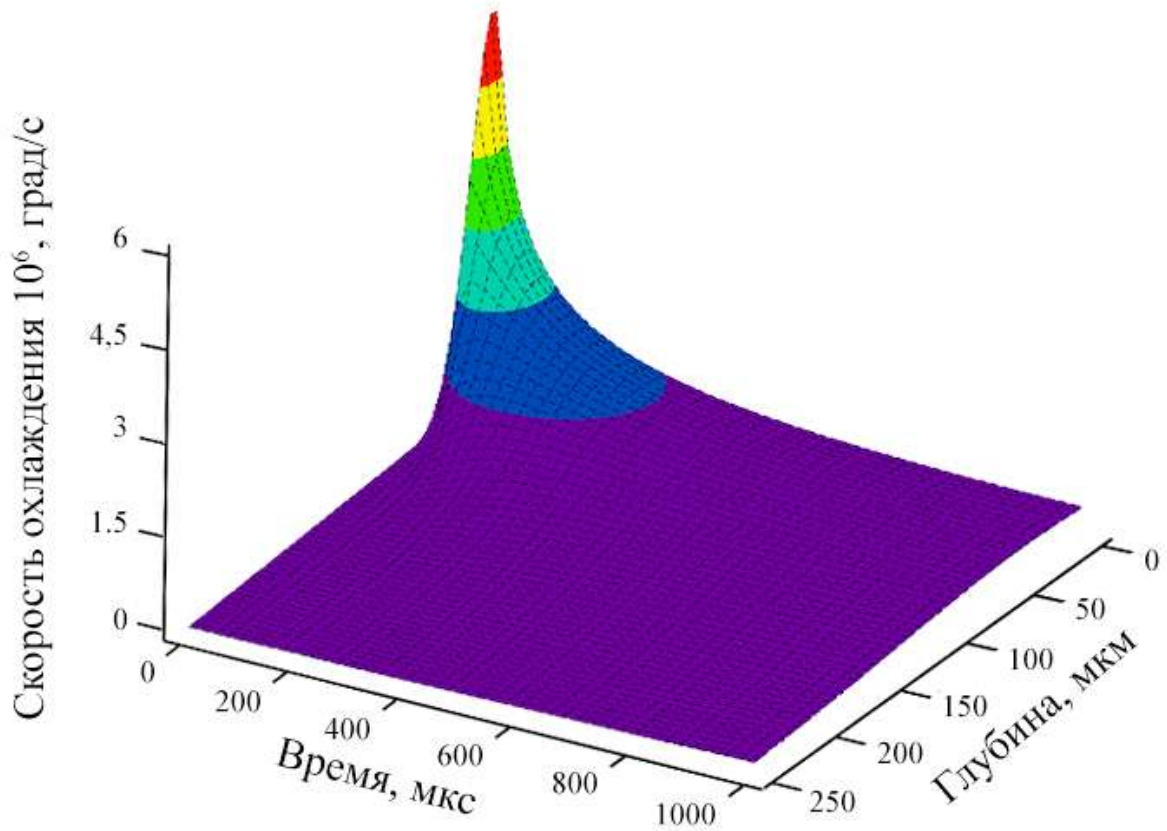


Рис. 10. Распределение скорости охлаждения по времени и глубине

Как было отмечено выше, закалка проводилась на волоконном импульсном лазере. После был сделан поперечный шлиф с травлением, четко демонстрирующий закаленный слой (см. рис. 11). Толщина слоя составила примерно 70 мкм, что близко к расчетному значению.

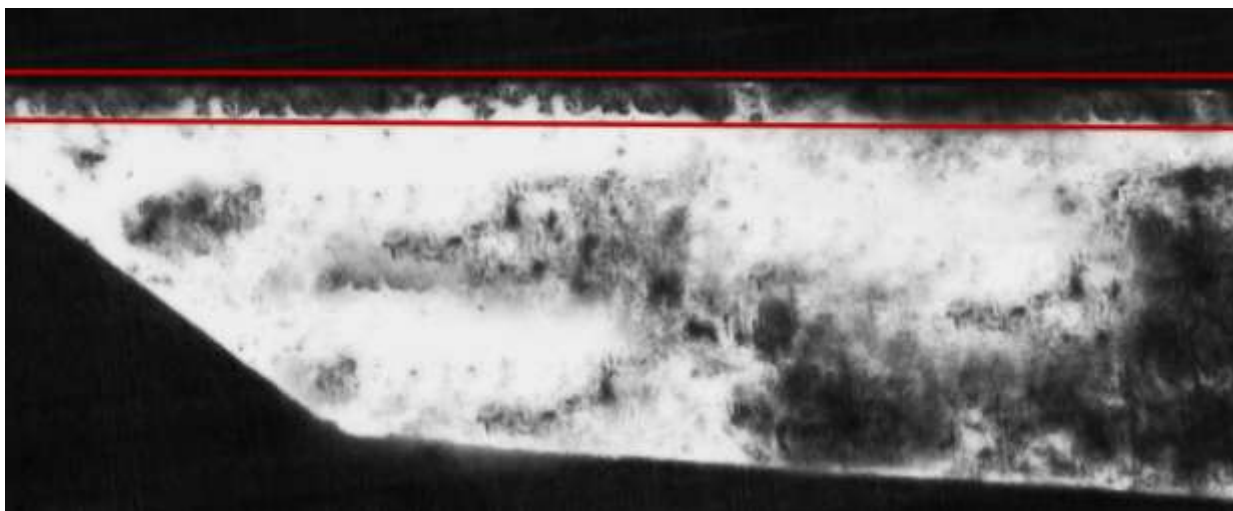


Рис. 11. Шлиф закаленной поверхности. В верхней части отчетливо видна темная полоса, закаленной на мартенсит стали.

Твердость незакаленной поверхности составила 420-430 HV, твердость поверхности после закалки – 550 HV, что свидетельствует об увеличении твердости на 30%. Однако вместе с увеличением твердости поверхности при закалке возникают сильные растягивающие напряжения, негативно отражающиеся на многих эксплуатационных характеристиках, таких как усталостная прочность, коррозионная стойкость, стойкость к крэкинг-коррозии и т.д. Таким образом, для деталей, испытывающих многократные циклические знакопеременные нагрузки, необходимо использовать метод, повышающий не только твердость, но и износостойкость.

Цимбал А.Л. СПбГУ ИТМО 2010г.