

## Тепловые процессы при поверхностном пластическом деформировании титановых сплавов

*Н. Д. Папшева, О.М. Акушская*

*Самарский государственный технический университет*

**Аннотация:** Приведено теоретическое определение температуры в контактной области при накатывании шариком и ультразвуковым упрочнении титановых сплавов ОТ-4, ВТ6 и ВТ9. Показано, что в результате деформации и работы сил трения происходит образование теплоты. При этом на общее температурное поле оказывают влияние геометрические параметры детали, подвергаемой обработке, время предшествующей обработки, общая тепловая мощность источников и характер теплообмена с окружающей средой. Предложено обобщенное решение максимальных контактных температур при накатывании шариком и ультразвуковым упрочнении методом движущихся источников.

**Ключевые слова:** ультразвук, упрочнение, накатывание шариком, контактная область, титановый сплав.

Обработка поверхностным пластическим деформированием (ППД) является одним из эффективных методов повышения надежности и долговечности деталей машин из труднообрабатываемых материалов, в том числе титановых сплавов, используемых для изготовления деталей, работающих в экстремальных условиях [1-3]. Как известно, титановые сплавы обладают особым сочетанием физических и механических свойств, к числу которых относятся высокая удельная прочность и теплостойкость, низкая тепло- и температуропроводность и т.д. В связи с низкой теплопроводностью для титановых сплавов характерна концентрация теплоты в приконтактной области, что может привести к снижению эксплуатационных характеристик. Для исследования тепловых явлений при накатывании шариком и ультразвуковым упрочнении использовали материалы двух структурных групп:  $\alpha$  – сплав ОТ-4 и  $(\alpha + \beta)$  – сплавы ВТ6 и ВТ9.

Интенсивные режимы обработки вследствие значительного повышения температуры поверхностного слоя вызывают термопластические деформации, которые снижают благоприятные остаточные напряжения

---

сжатия, а в некоторых случаях способствуют формированию остаточных растягивающих напряжений. Кроме этого комплексное воздействие высоких давлений и температур может привести к структурным превращениям [4,5]. При накатывании шариком и ультразвуковым упрочнении в результате деформации и работы сил трения происходит образование теплоты, которая расходуется на нагрев инструмента, обрабатываемой детали и теплообмен с окружающей средой.

Работа трения, вызванная перемещением инструмента по обрабатываемой поверхности, при ультразвуковом упрочнении свободно установленным в гнезде шаром и накатывании шариком весьма мала по сравнению с работой деформации, и ею можно пренебречь. Отдачей теплоты в окружающую среду с ошибкой в 1% так же можно пренебречь [6].

В квазистационарной стадии процесса при установившемся тепловом режиме, принимаем, что участки инструмента, контактирующие с деталью, оказываются прогретыми до максимальной температуры, так как постоянно подвергаются тепловому воздействию. При этом область контакта непрерывно перемещается относительно детали, встречаясь все время с ненагретыми точками. Поэтому температурные градиенты в направлении деформирующего инструмента значительно меньше величины градиента в детали. Таким образом, теплоотводом в инструмент в установившемся режиме можно пренебречь без существенного снижения точности.

Поэтому для ультразвукового упрочнения и накатывания шариком можно записать  $Q_d \approx Q_{dem}$ .

Источники теплоты, образующиеся в результате пластической деформации, при данных методах ППД локальные. При ультразвуковом упрочнении переменное периодическое усилие с частотой ультразвуковых колебаний накладывается на постоянное статическое усилие, создаваемое деформирующим инструментом (индентором). В соответствии с этим

---

тепловую мощность следует считать зависящей от времени переменной величиной [7].

Так как общая работа состоит из работы, производимой постоянным  $P_{cm}$  и периодическим усилием, то в соответствии с принципом суперпозиции рассматриваем два независимых источника теплоты. Мощность первого определяется следующим образом

$$q_1 = \frac{P_{cm}KV1000}{M60},$$

где  $K$  – коэффициент трения;  $V$  – скорость;  $M$  – механический эквивалент теплоты.

Мощность источника при накатывании шариком определяется аналогично.

Работа пластического внедрения индентора, производимая переменным периодическим усилием, совершается с частотой  $\omega$  циклов в минуту. В этом случае средняя мощность источника

$$q_{0(t)} = \frac{A\omega}{M},$$

где  $A$  – работа пластического внедрения;  $\omega$  – частота циклов.

В действительности происходит изменение усилия внедрения индентора в течение каждого цикла. Следовательно, меняется и мощность источника. Очевидно, что для расчета максимальных температур необходимо определить наибольшую (амплитудную) мощность источника  $q_0$ .

Примем, что изменение усилия, а соответственно и мощности происходит по косинусоидальному закону. Тогда  $f(t) = q_0 \cos \omega t$ .

При изучении образующихся в процессе ППД температурных полей температура в зоне деформации рассматривается как результат совместного действия двух полей: локального, которое возникает в момент деформации определенного участка детали и общего, возникающего от притока тепла от ранее деформированных участков.

---

На общее температурное поле влияют геометрические параметры подвергаемой обработке детали, время предшествующей обработки, суммарная тепловая мощность источников, характер и интенсивность теплового обмена с внешней средой [8]. Распределение же источников в детали практически не оказывает влияния на общее поле. Поэтому для каждого конкретного случая общий нагрев можно определить по любой известной зависимости, используя при схематизации формы источника и вида движения наиболее простой способ. Так, локальное температурное поле определяется формой источников и законом распределения мощности их тепловыделения и практически не зависит от остальных перечисленных выше факторов.

Принимаем, что источник теплоты имеет сферическую форму и нормальный закон распределения его интенсивности по трем пространственным координатам. В этом случае можно записать

$$F(x, y, z, t) = \frac{q_m}{c\gamma} \exp(-kR^2),$$

где  $q_m$  - максимальная интенсивность тепловыделения;  $c$  - теплоемкость;  $\gamma$  - удельный вес;  $k$  - коэффициент сосредоточенности тепловой мощности, характеризующий форму кривой нормального распределения;  $R$  - радиус-вектор рассматриваемой точки.

Для упрочнения с наложением ультразвука рекомендуется радиус отпечатка принять равным условному пятну нагрева  $r_n$ , где интенсивность тепловыделения  $q_i$  составляет 0,05 от наибольшей интенсивности в центре отпечатка. В этом случае  $k = \frac{3,0}{r_n^2}$ .

Так как форма детали практически не влияет на локальное температурное поле, то поверхность детали, подвергаемой обработке, принимаем плоской, представляя само изделие полупространством

---

$$-\infty < x < \infty; -\infty < y < \infty; z \geq 0.$$

Поверхность  $z=0$  полупространства будем считать адиабатической, начальную температуру примем равной нулю.

Интенсивность источников при накатывании шариком можно считать постоянной во времени, при ультразвуковом упрочнении происходит периодическое изменение интенсивности. При этом наибольший интерес представляет максимальное значение температуры в установившейся стадии процесса ППД.

Определим локальную составляющую температурного поля при максимальной температуре очага деформации. Примем, что максимальное значение контактной температуры близко к температуре точки  $O(0, 0, 0)$ , в которой интенсивность источников тепла наибольшая. Следует отметить, что при больших скоростях движения источника максимум температуры может быть несколько смещен от центральной точки  $(0, 0, 0)$  в сторону отставания по оси  $Ox$ .

Принимая  $X=Y=Z=0$  и учитывая, что при этом  $R_1=R_2=R=\sqrt{\xi^2+\eta^2+s^2}$  найдем изображение максимальной температуры контакта при произвольном распределении источников

$$T(p) = T(0,0,0,p) = \frac{1}{2\pi\alpha} \times \\ \times \int_0^\infty ds \int_{-\infty}^\infty F(\xi,\eta,s,p) \frac{1}{R} \exp\left(-\frac{V\xi}{2a}\right) \exp\left(-\frac{R\sqrt{p+\alpha}}{\sqrt{\alpha}}\right) d\xi d\eta,$$

где  $\alpha = \frac{V^2}{4a}$ ;  $\xi, \eta, s$  - координаты точек расположения тепловых источников в моменты времени;  $p$  - параметр преобразования Лапласа [9].

При ультразвуковом упрочнении действуют два независимых источника теплоты. От действия источника постоянной мощности  $q_1$  возникает температура  $T_1$ . На неё накладываются температурные колебания

$T(t)$ , которые возникают в результате дополнительного воздействия, зависящего от времени и изменяющегося по синусоидальному или косинусоидальному законам переменного источника  $q_0(t)$ . Если принять, что интенсивность источника переменной мощности  $q_0(t)$  изменяется во времени с частотой  $\omega$  по косинусоидальной зависимости, то общая тепловая мощность

$$q_0(t) = q_1 + q_0 \cos \omega t,$$

где  $q_0$  - амплитудное значение переменной составляющей тепловой мощности.

Результирующую температуру  $T(t)$  в квазистационарной стадии процесса можно записать как сумму постоянной составляющей температуры  $T_1$ , возникающей от постоянного источника  $q_1$ , и переменной составляющей  $T_0(t)$  от действия источника  $q_0(t) = q_1 + q_0 \cos \omega t$ ,

$$T(t) = T_1 + T_0(t).$$

При этом каждую составляющую контактной температуры можно искать отдельно, решая две самостоятельные задачи. Для определения переменной составляющей установившейся температуры  $T_0(t)$  воспользуемся (с некоторыми модификациями) методом, предложенным в работе [10]. Зависимость осциллирующей мощности источника от времени удобней представить в комплексной форме, полагая

$$q_0(t) = q_0 \exp(i\omega t).$$

Для вычисления максимальной температуры контактной области  $T(t)$  при ультразвуковом упрочнении следует добавить к амплитудному значению переменной постоянную составляющую контактной температуры. К найденной таким образом локальной температуре прибавляется температура общего поля, которая определяется каждый раз в зависимости от условий обработки и формы обрабатываемой детали:

$$T = \frac{2q_{cp}l}{\pi\lambda} \left[ \operatorname{ch}\left(\frac{V_s l}{2Q}\right) K_0\left(\frac{V_s l}{2Q}\right) + \operatorname{sh}\left(\frac{V_s l}{2Q}\right) K_1\left(\frac{V_s l}{2Q}\right) \right],$$

где  $l$ - половина ширины полосы контакта (радиус отпечатка);  $q_{cp}$  - усредненный тепловой поток, равный тепловой мощности отнесенной к середине поверхности пояса;  $\lambda$ -коэффициент теплопроводности,  $K_0(x)$  и  $K_1(x)$ - функции Макдональда нулевого и первого порядков соответственно;  $V_s$  – скорость движения источника.

### Литература

1. Физико-технологические основы методов обработки / [А.П. Бабичев и др.]; под ред. А.П. Бабичева. – Ростов н/Д: Феникс, 2006. 409 С.
2. Babichev A.P., Motrenko P.D. Fatigue Strength Increase during Vibrostriking of Parts using Multi-Contact Tool to account for Drilling Effect. // Proceedings of the 7th International Conference on Debarring and Surface Finishing. University of California at Berkeley, 2004, pp.461-463.
3. Rakhimyanov Kh Surface preparation of machine parts and instruments by ultrasonic impact treatment before coating / Kh Rakhimyanov, Ju Nikitin, Ju Semyonova // The Third International Forum on Strategic Technologies. Novosibirsk-Tomsk, Russia. 2008. pp.108-114.
4. Бескопыльный А.Н., Веремеенко А.А. Задача о статическом внедрении конического индентора в область с радиальными начальными напряжениями // Инженерный вестник Дона, 2012, №4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1368](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1368).
5. Ильичева О.А. Технология логического моделирования и анализа сложных систем// Инженерный вестник Дона, 2012, №4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1234](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1234)
6. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. М.: Машиностроение, 1986. 336с.
7. Тепловые процессы в технологических системах: учебник для вузов/А.Н. Резников, Л.А. Резников. М.: Машиностроение, 1990. 288с.

8. Отений Я. Н. Температура в контактной зоне при обработке деталей поверхностным пластическим деформированием//Известия высших учебных заведений. Машиностроение. №2. 2006. с. 57-62.
9. Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа. М.: Наука, 1989. 273с.
10. Папшева Н.Д., Акушская О.М. Влияние ППД на температуру в контактной области //Самолетостроение России. Проблемы и перспективы: материалы симпозиума с межд.участ. Самара: СГАУ, 2012. С.303-305.

### References

1. Babichev A.P. Fisico-tehnologicheskie osnovi metodov obrabotki [Physical and technological bases of processing methods]. Rostov n/D: Feniks, 2006. 409p.
2. Babichev A.P., Motrenko P.D. Proceedings of the 7th International Conference on Debarring and Surface Finishing. University of California at Berkeley, 2004. pp.461-463.
3. Rakhimyanov Kh. The Third International Forum on Strategic Technologies. Novosibirsk-Tomsk, Russia. 2008. pp.108-114.
4. Beskopilnii A.N., Veremeenko A.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012. №4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1368](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1368).
5. Ilicheva O.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012. №4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1234](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1234).
6. Reznikov A.N. Teplofizika processov mehanicheskoi obrabotki materialov [Thermal physics processes of machining materials]. М.: Mashinostroenie, 1986. 336 p.
7. Teplovie processi v tehnologicheskikh sistemah [Thermal processes in technological systems] / A.N. Reznikov, L.A.Reznikov. М.: Mashinostroenie, 1990. 228p.



8. Otenii Y.N. Izvestiai visshih uchebnih zavedenii. Mashinostroenie. №2. 2006. pp. 57-62.
9. Dech G. Rucovodstvo k prakticheskomu primeneniu preobrazovaniia Laplasa [Guide to the practical application of the Laplace transform]. M.: Nauka, 1989. 273 p.
10. Papsheva N.D., Akushskaia O.M. Samoletostroenie Rossii: problemi i perspektivi. Samara: SGAU, 2012. pp.303-305.