

УДК 621.923:536.2

¹В. И. Бутенко, д-р техн. наук, проф., ²Р. Г. Шаповалов, канд. техн. наук, доц.¹Донской государственный технический университет²Южный Федеральный университет¹E-mail: tag.tm@donstu.ru²E-mail: shapovalov116@mail.ru

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ

Выполнено аналитическое исследование энергетического состояния материала поверхностного слоя деталей, подвергнутого деформированию в процессе механической обработки, и получены формулы теоретического определения удельной энергии деформации и интенсивности накопления её в материале поверхностного слоя обрабатываемой детали, по величине которых можно судить о технологической совместимости модифицированных и многокомпонентных функциональных слоёв, наносимых на деталь, с материалом поверхностного слоя.

Ключевые слова: деталь, напряжённое состояние, материал, энергия, деформация, поверхностный слой, энергоёмкость.

V. I. Butenko, R. G. Shapovalov

ANALYTICAL STUDY OF THE ENERGY STATE OF MATERIAL SURFACE LAYER

An analytical study of the energy state of the material of the surface layer of parts subjected to deformation in the process of machining is performed, and formulas for the theoretical determination of the specific energy of deformation and the intensity of its accumulation in the material of the surface layer of the workpiece are obtained, the magnitude of which can be judged on the technological compatibility of the modified and multicomponent functional layers applied to the part with the material of the surface layer.

Keywords: part, stress state, material, energy, deformation, surface layer, energy intensity.

1. Введение

Исследованиям энергетического состояния материала поверхностного слоя деталей посвящено много работ, выполненных разными научными школами в области технологии машиностроения, металлообработки и контактного взаимодействия материалов [1 – 4]. Из существующего множества теорий и объяснений наличия поверхностной энергии обработанной детали наиболее приемлемым является объяснение энергетического состояния материала поверхностного слоя с точки зрения теории деформационного упрочнения, согласно которой энергетическое состояние материала обработанной поверхности детали и математическая модель расчёта так называемой скрытой энергии деформации определяется по параметрам кривой деформационного течения материала [3 – 5]. Однако в настоящее время отсутствуют формулы и методы определения удельной энергии деформации и интенсивности накопления её в материале поверхностного слоя детали при выполнении технологических операций обработки и эксплуатации, по величине которых можно судить о технологической совместимости модифицированных и многокомпонентных функциональных слоёв, наносимых на деталь, с материалом поверхностного слоя.

1. Основное содержание и результаты работы

В общем случае с позиции качественного рассмотрения модель формирования энергетического состояния материала поверхностного слоя детали можно представить

следующим образом. В процессе механической обработки детали под воздействием инструмента и энергонесущей среды (например, магнитного поля или ультразвуковых колебаний) в материале поверхностного слоя происходят изменения, приводящие к формированию его нового состояния, определяющего в дальнейшем эксплуатационные свойства детали.

Из работ [2 – 5] следует, что энергетическое состояние материала поверхностного слоя обработанной детали зависит от его напряжённого состояния. На рис. 1 приведено типовое распределение компонент тензора остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя детали, подвергнутой механической обработке. Очевидно, что деформированное состояние материала поверхностного слоя детали связано с его

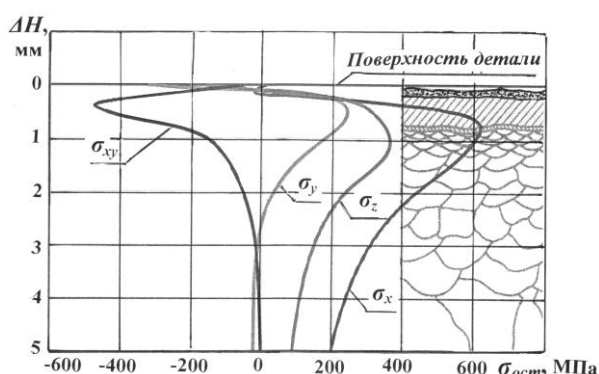


Рисунок 1. Распределение компонент тензора остаточных напряжений $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{xy}$ по толщине поверхностного слоя детали ΔH

внутренней энергией \mathcal{E}_∂ , определяемой суммой двух составляющих: потенциальной (скрытой) \mathcal{E}_n и кинетической (тепловой) \mathcal{E}_m энергиями, тесно связанными между собой. В связи с этим для оценки и прогнозирования эксплуатационных свойств поверхностного слоя детали необходимо учитывать внутреннюю энергию \mathcal{E}_∂ , запасённую в деформированном материале поверхностного слоя, прошедшего все этапы обработки. Согласно данным, приведённым в работе [5], энергетическое состояние деформированного материала поверхностного слоя детали может быть представлено следующей зависимостью:

$$\mathcal{e}(\Delta H, t) = \mathcal{e}_0(\Delta H, 0) + \sum_{i=1}^{N_i} \int_0^{\Delta H} \mathcal{e}(\Delta H, t_i) dt, \tag{1}$$

где $\mathcal{e}(\Delta H, t)$ – плотность внутренней энергии элемента поверхностного слоя детали, подвергнутой механической обработке; $\mathcal{e}(\Delta H, 0)$ – плотность внутренней энергии в элементе поверхностного слоя детали в исходном состоянии при $t = 0$ с учётом наследственных свойств материала; $\mathcal{e}(\Delta H, t_i) dt$ – скорость изменения плотности внутренней энергии в элементе поверхностного слоя при его деформировании за время t_i по толщине ΔH ; N_i – число циклов силового нагружения материала поверхностного слоя детали при выполнении заданной операции механической обработки.

Для количественной оценки энергетического состояния материала поверхностного слоя детали можно воспользоваться аналогией между процессами поглощения энергии кристаллической решётки при механическом воздействии и при нагреве, что справедливо, так как в том и другом случаях нарушение межатомных связей наступает

именно в результате поглощения кристаллической решёткой внутренней энергии \mathcal{E} , значение которой может быть определено по формуле

$$\mathcal{E} = \int_{\Theta_n}^{\Theta_S} c_p d\Theta + E_{пл}, \tag{2}$$

где Θ_n – начальная температура пластической деформации; Θ_S – температура плавления материала детали; c_p – удельная теплоёмкость материала обрабатываемой детали; $E_{пл}$ – скрытая теплота плавления.

Величина $\int_{\Theta_n}^{\Theta_S} c_p d\Theta$ характеризует изменение теплосодержания обрабатываемого

материала детали при нагреве его в процессе деформации от заданной температуры до температуры плавления и расходуется на возбуждение атомных колебаний критической величины без нарушения межатомных связей. Как известно, эти нарушения возникают в тех случаях, когда кристаллическая решётка поглощает дополнительную энергию, равную скрытой теплоте плавления $E_{пл}$ [5].

Таким образом, можно считать, что энергетическое состояние материала поверхностного слоя детали формируется в результате одновременного воздействия на него теплового и деформационного факторов, причём последний может быть выражен через показатель дислокационной насыщенности K_ρ , характеризующий искажение кристаллической решётки. Об этом свидетельствуют результаты исследования зависимости удельной энергии деформирования $\mathcal{E}_{уд}$ от K_ρ и Θ при различных способах обработки детали (рис. 2).

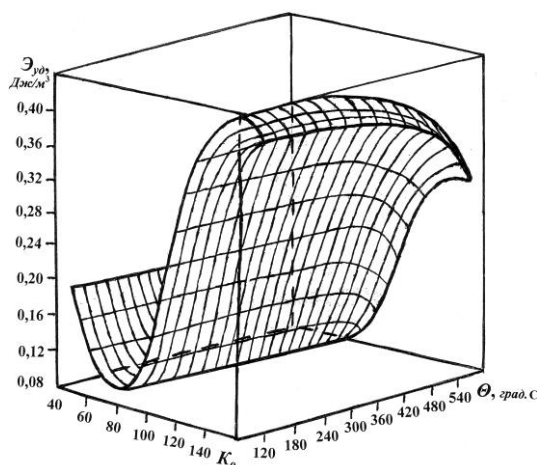


Рисунок 2. Зависимость удельной энергии деформирования $\mathcal{E}_{уд}$ от K_ρ и Θ

Если принять, что удельная энергия, затраченная на искажение кристаллической решётки, не зависит от вида подводимой энергии (тепловой или механической), то величина энергии E^* , которую способна поглотить кристаллическая решётка, может быть определена по формуле

$$E^* = \int_{\Theta_n}^{\Theta_S} c_p d\Theta = E_{\Theta_S} - E_{293}, \tag{3}$$

где E_{Θ_S} – теплосодержание (энтальпия) обрабатываемого материала в твёрдом состоянии при температуре Θ_S ; E_{293} – энтальпия материала при температуре 293К.

Если принять, что $E^* \approx \mathcal{E}$, то работа $A(t)$, затраченная на изменение энергетического состояния элемента поверхностного слоя детали для конкретных условий обработки определится по формуле

$$A(t) = (1 + K_{mnd})(E^* - \mathcal{E}_0), \tag{4}$$

где K_{mnd} – коэффициент, учитывающий величину тепловой энергии пластической деформации, не задерживаемой в деформируемом элементе материала поверхностного слоя детали; по данным американских учёных Гринвуд Д. и Трипп Е. значение коэффициента $K_{mnd} = 3,5 - 4,0$; \mathcal{E}_0 – внутренняя энергия недеформируемого материала.

Следует отметить, что такая аналогия правомерна только на уровне локальных объёмов материала поверхностного слоя обрабатываемой детали, которые обладают удельной энергией предельной величины. Перенос её на уровень больших объёмов, соизмеримых с величиной $v_{\partial.м.} = \Delta H \times S_0 \times K_n$ (здесь ΔH – средняя толщина поверхностного слоя детали; S_0 – площадь обработанной поверхности детали; K_n – коэффициент неравномерности толщины поверхностного слоя по площади обработанной поверхности детали) не правомерен вследствие того, что в процессе простого нагрева энергия поглощается элементарным объёмом (например, кристаллической решёткой) практически равномерно по всему объёму, в то время, как при упруго-пластической деформации из-за анизотропности и несовершенства кристаллической решётки по всему объёму $v_{\partial.м.}$ происходит неравномерное поглощение энергии.

Пусть при подведении механической энергии к обрабатываемой детали процессом упруго-пластической деформации будет охвачен объём $v_{\partial.м.}$, состоящий из ограниченного (известного) числа элементарных объёмов (например, кристаллических решёток). Тогда энергия искажения кристаллической решётки \mathcal{E}^{kp} , произошедшая в объёме v , может быть определена по формуле [6]:

$$\mathcal{E}^{kp} = v \times \Delta E_{\Theta S}, \tag{5}$$

где $\Delta E_{\Theta S}$ – изменение энтальпии материала поверхностного слоя обрабатываемой детали.

Теоретически величина $\Delta E_{\Theta S}$ может быть определена из следующих известных уравнений термодинамики:

$$\Delta E_{\Theta S} = \left(\frac{\partial E_{\Theta S}}{\partial v} \right)_{\Theta} dv + \left(\frac{\partial E_{\Theta S}}{\partial \Theta} \right)_{v} d\Theta; \Delta E_{\Theta S} = A \left(\frac{\partial E_{\Theta S}}{\partial \Theta} \right)_{v} d\Theta + \frac{c_v}{\Theta} dv, \tag{6}$$

где A – работа, затраченная на изменение энергетического состояния материала поверхностного слоя в процессе обработки детали; c_v – объёмная теплоёмкость материала поверхностного слоя детали.

В общем случае работа A может быть определена по формуле (4), а объёмная теплоёмкость материала поверхностного слоя c_v находится из следующего уравнения термодинамики:

$$\Delta Q = c_v \cdot d\Theta + A p \cdot dv, \tag{7}$$

где ΔQ – количество теплоты, полученной при деформировании материала поверхностного слоя в процессе обработки детали; определяется методом калориметрирования [7].

Каждый единичный (локальный) объём материала поверхностного слоя в охватываемом упруго-пластической деформацией объёме v (за исключением критического объёма искажения) накапливает в процессе механической обработки какую-то долю энергии искажения, численно равную $m \times \Delta E_{\Theta S}$, где множитель m зависит от глубины залегания локального объёма h в пределах рассматриваемого объёма v и изменяется от 1 при $h = \Delta H$ до 0 на границе поверхностного слоя детали. Если принять $m =$

$m(h)$, то величину энергии ε_v поглощённую локальным объёмом v по толщине ΔH , можно определить по формуле

$$\varepsilon_v = v \cdot \Delta E_{\text{ос}} \int_0^{\Delta H} m(h) dh. \tag{8}$$

Если просуммировать выражения (5) и (8), то формула для определения общей энергии локального объёма материала поверхностного слоя детали $\varepsilon(h)$, находящегося на глубине h , после соответствующего преобразования будет иметь вид:

$$\varepsilon(h) = \varepsilon^{kp} + \varepsilon_v = v \cdot \Delta E_{\text{ос}} \left(1 + \int_0^{\Delta H} m(h) dh \right). \tag{9}$$

По существу, формула (9) представляет собой зависимость, по которой можно теоретически можно определять удельную величину накопленной энергии деформации $\mathcal{E}_{y\delta}$.

Для определения общей энергоёмкости материала поверхностного слоя обработанной детали \mathcal{E}_{Σ} необходимо в формулу (9) вместо объёма v подставить объём деформированного материала $v_{\text{д.м.}}$:

$$\mathcal{E}_{\Sigma} = \Delta H \cdot S_0 \cdot \Delta E_{\text{ос}} \left(1 + \int_0^{\Delta H} m(h) dh \right) \cdot K_n. \tag{10}$$

Для количественного определения изменения энтальпии материала поверхностного слоя детали $\Delta E_{\text{ос}}$, энергии E^* , поглощённой кристаллической решёткой, и других величин теплосодержания материала может быть использован калориметрический метод, разработанный проф. А.Н. Резниковым и описанный в работе [7].

Выполнены сравнительные исследования определения энергоёмкости материала поверхностного слоя обработанной детали \mathcal{E}_{Σ} расчётным путём по формуле (10) и экспериментально с использованием двухстадийного дифференциального импульсного калориметра [7] для разных обрабатываемых материалов и способов обработки на режимах, рекомендуемых справочной литературой. Результаты исследований приведены в табл. 1, из анализа которой следует, что рассчитанные по формуле (10) значения энергоёмкости материала поверхностного слоя деталей, обработанных различными способами, не значительно отличаются от их экспериментальных значений.

Таблица 1. Результаты определения \mathcal{E}_{Σ} расчётным и экспериментальным путями

Обрабатываемый материал	Способ обработки	Толщина слоя ΔH , мм	Энергоёмкость поверхностного слоя \mathcal{E}_{Σ} , Дж		Погрешность определения $\Delta \mathcal{E}_{\Sigma}$, %
			расчётная	экспериментальная	
сталь 12ХН3А	шлифование	0,31	23,638	25	+5,7
	обкатка роликом	0,65	30,521	33	+8,1
	алмазное выглаживание	0,12	9,237	8	-13,2
сталь ШХ15	шлифование	0,38	28,426	30	+5,6
	обкатка роликом	0,52	43,084	45	+4,6
	алмазное выглаживание	0,10	10,352	9	-6,0
сплав 45Х25Н2 0С2А	шлифование	0,42	31,648	35	+10,7
	обкатка роликом	0,83	56,745	60	+5,9
	алмазное выглаживание	0,14	11,892	11	-8,6

Если выражение (10) разделить на работу $A(t)$, вычисляемую по формуле (4), то получится формула для определения интенсивности накопления энергии деформации в материале поверхностного слоя обрабатываемой детали:

$$I_{\Sigma} = \frac{\Sigma_{\Sigma}}{A(t)} = \frac{\Delta H \cdot S_0 \cdot \Delta E_{\text{ос}} \cdot (1 + \int_0^{\Delta H} m(h) dh) \cdot K_n}{(1 + K_{\text{мид}}) \cdot (E^* - \Sigma_0)}. \quad (11)$$

Очевидно, что технологическая совместимость модифицированных и многокомпонентных функциональных слоёв с основным материалом поверхностного слоя деталей зависит от энергетического состояния материала поверхностного слоя детали и во многом определяется тем, как эти слои трансформируют поверхностную энергию основного материала детали. Поэтому формула (11) может быть использована для установления целесообразности применения того или иного материала для модифицирования поверхностного слоя детали или нанесения на него многокомпонентного функционального слоя.

2. Заключение

Таким образом, выполненные исследования позволили разработать математическую модель формирования энергетического состояния материала поверхностного слоя детали, находящегося в деформированном состоянии, и количественно оценить влияние дислокационной структуры материала и температуры на величину удельной накопленной энергии деформации, определяющей эксплуатационные свойства поверхностного слоя и технологическую совместимость модифицированных и многокомпонентных функциональных слоёв, наносимых на деталь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мусохранов, М. В. Энергетическое состояние поверхностного слоя деталей машин / М. В. Мусохранов, Е. В. Логутенкова, С. П. Сорокин // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 5-2. – С. 276 – 279.
2. Кабалдин, Ю. Г. Квантово-механическое моделирование энергии адгезии наноструктурных покрытий с режущим инструментом и с обрабатываемым материалом / Ю. Г. Кабалдин, Е. Е. Власов, А. М. Кузьмишина // Упрочняющие технологии и покрытия. – Том 14. – 2018. – № 8 (164). – С. 339 – 343.
3. Прокофьев, М. А. Энергетический критерий оптимизации режимов обработки деталей шлифованием / М. А. Прокофьев // Машиностроение – основа технологического развития России. ТМ-2013: Сб. науч. ст. V Междунар. науч.-техн. конф. – Курск: Издательство Юго-Зап. гос. ун-та, 2013. – С. 334 – 336.
4. Бутенко, В. И. Научные основы функциональной инженерии поверхностного слоя деталей машин / В. И. Бутенко. – Ростов на-Дону: ДГТУ, 2017. – 481 с.
5. Лебедев, В. А. Технология динамических методов поверхностного пластического деформирования / В. А. Лебедев. – Ростов-на-Дону, 2006. – 183 с.
6. Бутенко, В. И. Структура и свойства материалов в экстремальных условиях эксплуатации / В. И. Бутенко. – Таганрог: Издательство ТТИ ЮФУ, 2007. – 264 с.
7. Тимофеев, М. В. Методика и аппаратура измерения накопленной энергии деформации в поверхностном слое деталей машин / М. В. Тимофеев, М. А. Прокофьев // Наукоемкие технологии в машиностроении и авиадвигателестроении (ТМ-2012): Материалы 4-ой Междунар. науч.-техн. конф. – Рыбинск: Изд-во РГАТУ, 2012. – С. 25 – 29.

Поступила в редколлегию 04.01.2019 г.