

УДК 536.75: 621.7: 621.8: 621.9

*М. Л. Хейфец, Л. М. Кожуро, А. А. Шипко,  
И. А. Сенчило*

## РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ. I. АНАЛИЗ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

*На основании уравнения фаз и краевых условий рассмотрена открытая технологическо-эксплуатационная система в процессе эволюции к стационарному состоянию. Намечены основные пути повышения эффективности комбинированных методов обработки. Проведен системный анализ термомеханической обработки.*

**1. Системный анализ комбинированных методов обработки.** На современном этапе научно-технического прогресса требования, предъявляемые к прочности, твердости, вязкости, износостойкости поверхности, столь высоки, что традиционные методы обработки в ряде случаев не позволяют достаточно эффективно получить необходимые параметры качества поверхностных слоев. В связи с этим на предприятиях современного производства все чаще применяются комбинированные методы обработки [1], использующие плазменные [2], электродуговые [3], лазерные [4], электрошо-лучевые [5], ионно-вакуумные [6] и другие источники энергии.

Традиционные методы обработки позволяют с позиций эксплуатационной и технологической наследственности [7, 8] предложить рациональные конструкции модифицированных слоев. Однако взаимозависимость используемых потоков энергии при последовательном или параллельном формировании различных поверхностных слоев требует рассмотрения самих процессов создания рациональных конструкций модифицированных слоев.

Для описания процессов создания поверхностных слоев при воздействиях концентрированными потоками энергии необходимо исследовать открытую технологическую систему с дополнительными степенями свободы и рассмотреть формирование диссипативных структур и фаз, рассеивающих избыток подводимой энергии [1]. Для получения модифицированных слоев с определенными структурами или фазами требуется рассмотреть связь степеней свободы системы с формирующими фазами, определить рациональное число и структуру взаимосвязи степеней свободы, и в результате этого на основании оптимизации степеней свободы сконструировать расположение конкретных фаз в поверхностных слоях детали.

**1.1 Уравнение фаз.** Количество фаз (структур)  $\Phi$  в соответствии с числом компонентов вещества  $K$  и числом переменных налагаемых полей (потоков энергии)  $\Pi$  определяется уравнением Гиббса [9]:

$$\Phi = K + \Pi - C .$$

Уравнение получено для замкнутой, равновесной системы, исходя из того, что

$$F = U - T\varepsilon = \text{const} \quad \text{или} \quad Z = H^* - T\varepsilon = \text{const} .$$

Вместе с тем приведенные условия выполнимы и для открытой системы, когда дополнительные потоки энергии полностью рассеиваются диссипативными структурами.

Функция диссипации и производство энтропии [10]  $\Psi = T\sigma = Td\varepsilon/dt$  вследствие второго начала термодинамики возрастают ( $\Psi \geq 0$ ,  $\sigma \geq 0$ ) во времени  $\tau$ .

В замкнутых условиях, в процессе эволюции с  $d\varepsilon \geq 0$ , система движется к состоянию равновесия, в котором  $\varepsilon = \text{max}$ ; при этом производство энтропии не возрастает:  $d\sigma \leq 0$ . В открытой системе условие эволюции сохраняется:  $d\sigma \leq 0$ , а условие равновесия предполагает  $\sigma = \text{min}$ ,  $d\sigma = 0$ ; при производной по времени:  $d\sigma/d\tau \leq 0$ .

Согласно фундаментальной теореме Пригожина – Гленсдорфа [11], при эволюции во времени  $\tau$  к стационарному состоянию произвольные системы с неизменяемыми по времени крайними условиями выполняют: условие эволюции ( $d\sigma \leq 0$ ), условие стационарности ( $d\sigma = 0$ ) и условие устойчивости ( $\delta\sigma \geq 0$ ).

Следовательно, исходные условия выполняются как для замкнутых, так и для открытых равновесных систем, причем для последних появляется дополнительное ограничение:  $d\sigma/d\tau \leq 0$ , а значит, уравнение Гиббса позволяет рассматривать открытые системы.

На конкретных операциях технологического процесса и стадиях эксплуатации детали при неизменном числе компонентов  $K$  используемых веществ и потоков  $\Pi$  вносимой энергии управлять формирующимися фазами  $\Phi$  согласно уравнению Гиббса позволяют степени свободы  $S$  системы.

Вследствие чувствительной зависимости от начальных условий технологическо-эксплуатационной системы ее рационально представить в виде странного аттрактора, которому достаточно трех степеней свободы для возникновения хаотического режима [12]. Следовательно, во избежание непредсказуемости детерминированных потоков вещества и энергии, для их диссипации системе нужно предоставлять не более двух степеней свободы.

*1.2. Начальные и граничные условия.* Классификация технологических процессов (см. таблицу) на: разделение обрабатываемого материала на заготовки объемом  $V_1$  и изготовление детали объемом  $V_2$ ; нанесение покрытия ( $V_2 > V_1$ ); термообработку ( $V_2 = V_1$ ); резание ( $V_2 < V_1$ ) и деформирование ( $V_2 = V_1$ ) [13] позволяет формулировать граничные условия открытой технологическо-эксплуатационной системы. Дополнительные степени свободы условных границ, такие, как перемещения, обновления, дают возможность управлять неравновесным состоянием технологическо-эксплуатационной системы [14]. Классификация трибологических процессов при эксплуатации поверхности на стадии: приработки с интенсивностью износа  $U_0$ ; установившихся процессов трения и износа интенсивностью  $U_1$  ( $U_1 < U_0$ ) и разрушения интенсивностью  $U_2$  ( $U_2 \gg \gg U_1$ ) [15] дает возможность определить начальные условия изменяющейся технологическо-эксплуатационной системы. Дополнительные воздействия потоками энергии в начальный момент стадии обеспечивают условия, ведущие к стабилизации неравновесных технологических и эксплуатационных процессов [1].

Комбинированные методы формирования поверхностей: нашедшие эффективное применение в производстве (×) [15...30] и методы, использование которых малоэффективно (-) или практически невозможно (0)

Зоны тепловыделений	Типовые источники энергии и их мощность $q$ , Вт/см <sup>2</sup>	I. Разделение				II. Нанесение покрытия				III. Термообработка				IV. Резание инструментом				V. Деформирование			
		Термообработка	Высокотемпературная	Среднетемпературная	Испарение	Напыление	Однократное аморфизация	Полупроводник	Диффузия	Термоупрочнение	Закалка	Отжиг	Отпуск	Деление	С выделением перемешивания	Саморазрушающиеся	Абразив	Болван	Пластина	Резак	Шарик
I. Объемная	Процессы разрушения (ПР), $3 \cdot 10^3 \dots 10^3$ III''	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	×	×	×	×	×	×	×
	Индукционный нагрев (ИН), $(10^2) \dots 10^3 \dots 10^4$	-	-	0	0	×	×	×	×	-	-	-	-	×	×	×	-	×	×	×	×
	Газовое пламя (ГП), $10^2 \dots 10^3 \dots (3 \cdot 10^3)$	-	×	×	-	×	×	×	×	-	-	-	-	×	×	×	-	×	×	×	×
	Плазменная дуга (ПД), $5 \cdot 10^2 \dots 3 \cdot 10^4$	×	×	×	-	×	×	×	×	-	-	-	-	×	×	×	-	×	×	×	×
II. Множество локальных	Процессы трения (ПТ), $10^3 \dots 3 \cdot 10^4$ II''	-	0	0	0	×	-	-	-	-	-	-	-	×	×	×	×	-	×	×	×
	Электро-контактный подогрев (ЭП), $10^3 \dots 5 \cdot 10^4$	-	-	0	0	×	-	-	-	-	-	-	-	×	×	×	×	-	×	×	×
	Сварочная дуга (СД), $10^3 \dots 10^5 \dots (10^6)$	-	-	×	×	×	×	×	×	-	-	-	-	×	×	×	-	×	×	×	×
	Искровой разряд (ИР), $5 \cdot 10^8 \dots 8 \cdot 10^8$	-	-	-	-	×	×	×	×	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
III. Единичная локальная	Процессы приработки (ПП), $(10^3) \dots 3 \cdot 10^4 \dots 8 \cdot 10^8$ I''	-	0	0	0	-	×	-	×	-	-	-	-	×	×	×	×	×	×	×	×
	Электронный ионный луч (ЭЛ), $(10^3) \dots 10^6 \dots 8 \cdot 10^8$	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Непрерывный лазер (НЛ), $(5 \cdot 10^3) \dots 10^6 \dots 10^9$	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	-	×	×	×	×
	Импульсно-периодический лазер (ИЛ), $(10^7) \dots 10^{10} \dots 10^{14}$	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	-	×	×	×	×

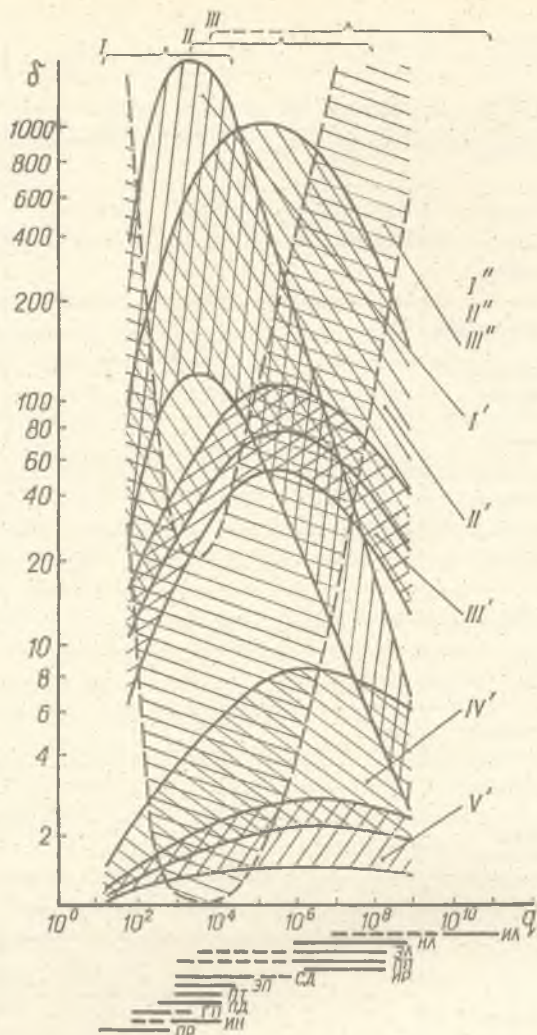


Рис. 1. Распределение операций формирования поверхностей деталей и стадий эксплуатации по точности обработки  $\delta$  (мкм) и качеству поверхностей в зависимости от плотности мощности  $q$  ( $\text{Вт}/\text{см}^2$ ) типовых источников с различными уровнями концентрации энергии. Обозначения см. в таблице

Эффективность комбинированных способов обработки и эксплуатации [1], полученных в результате совмещения методов, изменяющих граничные условия путем внесения дополнительных степеней свободы перемещением рабочего тела (инструмента, технологической среды, удаляемого припуска, формируемой поверхности) [16–20], и методов, изменяющих начальные условия использованием дополнительных источников различных уровней концентрации энергии (с объемной I, множеством локальных II, единственной локальной III зонами тепловыделения) [21–25], проанализирована в таблице. Как видим, в настоящее время в производственных условиях возможна реализация большинства современных методов и лишь незначительное число практически невозпроизводимо, но вместе с тем эти сочетания комбинированных воздействий проявляются в качестве побочных явлений и эффектов при формировании и эксплуатации поверхностей. Анализ эффективности показывает целесообразность применения комбинированных методов, совмещающих механические и тепловые воздействия [26–30].

Изучение распределения комбинированных методов обработки и эксплуатации по точности формирования поверхности проводилось по предложенной в таблице классификации в зависимости от уровня концентрации энергии (I, II, III) для различных типовых источников (рис. 1). Для деформирования и резания точность обработки поверхности оценивалась по отклонениям размеров и форм, по волнистости и шероховатости; для термообработки — по неравномерностям глубины термоупрочнения или разупрочнения, по толщине дефектного поверхностного слоя; для нанесения и разделения учитывались все перечисленные показатели.

Анализ точности формирования поверхности показывает (рис. 1): от первого к третьему уровню концентрации энергии (I → II → III) происходит повышение плотности мощности, что в свою очередь ведет к снижению размеров зоны тепловыделения. Уменьшение размеров зон тепловыделения (от I' к V') и стадий эксплуатации (от III'' к I'') приводит к повышению концентрации напряжений, поле которых определяет формируемую поверхность, ее точность. Очевидно, что на уровне I точность не возрастает вследствие увеличения не столько концентрации энергии, сколько размера зоны тепловыделения. На уровне II точность минимальна в результате формирования поверхности по разбросанным в большом объеме концентраторам напряжений, образованным множеством локальных зон тепловыделения. На уровне III точность не снижается, а затем и резко увеличивается вследствие фокусировки локальной зоны тепловыделения, сопровождающейся ускоренным ростом концентрации напряжений.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод о целесообразности обеспечения начальных условий, соответствующим подбором концентрированных источников энергии, при заданных граничных условиях на различных технологических операциях формирования и стадиях эксплуатации поверхностей. Типовые источники уровня I наиболее рационально применять для процессов формоизменения больших объемов при деформации, значительных припусках при резании и слоев при нанесении покрытий, при объемной термообработке, разделении и разрушении деталей крупногабаритных форм. Источники уровня II наиболее сильно снижают точность формирования поверхности и поэтому их целесообразно применять в сочетании с режущими и деформирующими инструментами, в том числе в процессах нанесения покрытий и термообработки. Использование этих источников не приводит к интенсивному разрушению поверхностей и существенно влияет на процессы трения поверхностей. Наилучшие результаты на всех технологических операциях процессов формирования поверхностей дает воздействие источниками уровня III. Наиболее активно при эксплуатации эти источники проявляют себя в процессах приработки. Данные [15–30] (см. таблицу) подтверждают этот вывод, а исследования точности формирования поверхностей свидетельствуют о целесообразности предложенной выше классификации комбинированных методов обработки [1].

*1.3. Пути повышения эффективности обработки.* Проведенный обзор позволяет наметить пути повышения эффективности процессов формирования и эксплуатации поверхностей заданной точности и других параметров качества. Технологическо-эксплуатационная система комбинированной обработки представляется открытой в основном для тепловых и механических потоков энергии, которые определяют изменяющиеся начальные и граничные условия при эксплуатации и формировании поверхностей вплоть до микронной точности. Избыток подводимой энергии сверх определенного предела, в котором система поддерживает динамическое равновесие, должен

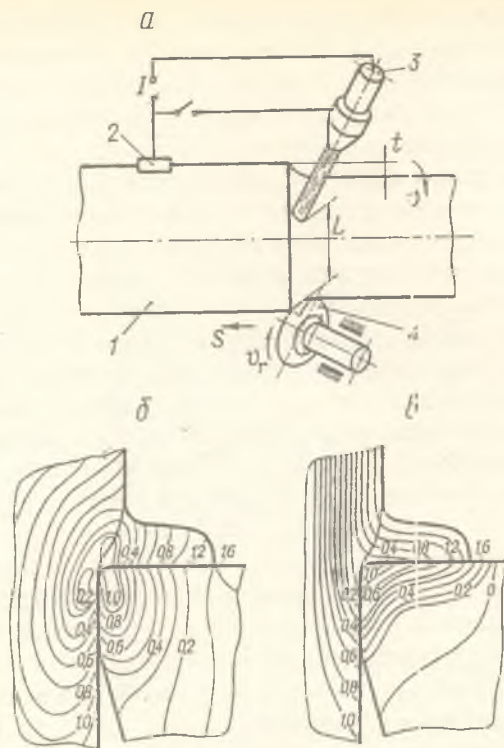


Рис. 2. Схема ротационного резания с плазменным нагревом (*a*) (*1* – обрабатываемая деталь; *2* – скользящий контакт; *3* – плазматрон; *4* – ротационный резец), поле напряжений (*б*) (1,0 соответствует 1000 МПа) и тепловое поле (*в*) (1,0 соответствует 1000 К) в зоне формирования поверхности (размеры даны в мм)

иметь возможность рассеиваться, поглощаться за счет дополнительных степеней свободы системы с границей, образованной на данной или предыдущих операциях формирования или стадиях эксплуатации поверхности. В термомеханической системе дополнительные степени свободы выражаются перемещениями, вращениями или другими движениями рабочего тела (инструмента, технологических и эксплуатационных сред и материалов), а также наличием дополнительных структур, фаз, увеличением количества разделяющих их поверхностей, поглощающих избыток энергии и сохраняющих при этом процесс формирования или эксплуатации в одном или нескольких определенных состояниях. Следовательно, повышение эффективности формирования и эксплуатации поверхностей обеспечивается использованием дополнительных потоков энергии и степеней свободы элементов системы. Зона взаимодействия потока энергии с поверхностью при увеличении концентрации энергии в результате эволюции распадается из объемно-распределенной на множество локальных, а затем фокусируется в единое пятно. Дополнительные степени свободы элементов системы позволяют обновить поверхности, фазы, структуры и тем самым сохранить процессы взаимодействия потоков энергии с поверхностью в определенных состояниях. Рассмотрим ряд комбинированных методов, совмещающих различные технологические операции формирования и стадии эксплуатации поверхностей, в каждом из которых используется по одному из группы I, II, III источнику энергии. Объемный источник, такой как плазменная дуга, применяется для нанесения покрытия из порошка или проволоки и предварительного нагрева при резании и деформировании

свободно вращающимся ротационным инструментом. Множество локальных источников используется для электромагнитной наплавки порошка с последующим поверхностным пластическим деформированием и выглаживанием нагретой поверхности. Единый сфокусированный источник применяется при электронно-лучевом нагреве поверхности с покрытием, при модификации поверхностей ионной имплантацией и ионным осаждением, а также позволяет совместить технологические операции с подготовкой в процессе эксплуатации детали.

Поскольку пространственные и временные масштабы рассматриваемых процессов комбинированных методов существенно различаются, при их изучении используем различную аппаратуру и методики. Опишем результаты взаимодействия разнообразных потоков вещества и энергии в комбинированных методах при формировании и эксплуатации поверхностей, последовательно дополняя и конкретизируя рекомендации по разработке очередного рассматриваемого метода. На основании полученных результатов сформулируем выводы, общие для комбинированных методов, вне зависимости от их специфических особенностей.

**2. Ротационное резание с плазменным нагревом.** Ротационное резание с плазменным нагревом – технологический процесс, совмещающий операции нанесения и термообработки покрытий с удалением дефектного поверхностного слоя резанием и деформированием обработанной поверхности (рис. 2, а). Метод используется при упрочнении и восстановлении деталей машин износостойкими высокопрочными покрытиями [2]. Для временного снижения прочности дефектного поверхностного слоя покрытий используется предварительный нагрев или технологическое тепло наплавки, изменяющие начальные условия процесса. Для удаления припуска применяется ротационный инструмент, изменяющий граничные условия дополнительными перемещениями режущего лезвия. Комбинированное термомеханическое воздействие позволяет снижать амплитуды колебаний тепловых и динамических нагрузок и тем самым стабилизировать процесс обработки.

*2.1. Методика исследований.* Сначала на основании полученных экспериментальных данных по составляющим  $P_z, P_y, P_x$  силы резания, контактными площадкам  $l, h$  и усадке стружек  $k$  определялись поля напряжений (рис. 2, б) в режущем инструменте, срезаемом и поверхностном слоях обрабатываемой детали.

Для обрабатываемого материала нормальные  $\sigma_z, \sigma_y$  и касательные  $\tau_{zy}$  напряжения в текущей точке с координатами  $(z, y)$  рассчитывались по функциям напряжений Эри для полупространства [31]:

$$\sigma_z = \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} -\frac{2g(\Theta)}{\pi} \cos^2 \Theta d\Theta, \quad \sigma_y = \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} -\frac{2g(\Theta)}{\pi} \sin^2 \Theta d\Theta,$$

$$\tau_{zy} = \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} -\frac{g(\Theta)}{\pi} \sin 2\Theta d\Theta.$$

В режущем клине напряжения  $\sigma_z, \sigma_y$  и  $\tau_{zy}$  определялись методом компенсирующих нагрузок [32], предложенным Хетены для четверти пространства [33].

Поля напряжений (рис. 2, б) строились для эквивалентных напряжений  $\sigma_e$ , которые определялись по универсальной теории прочности Кулона –

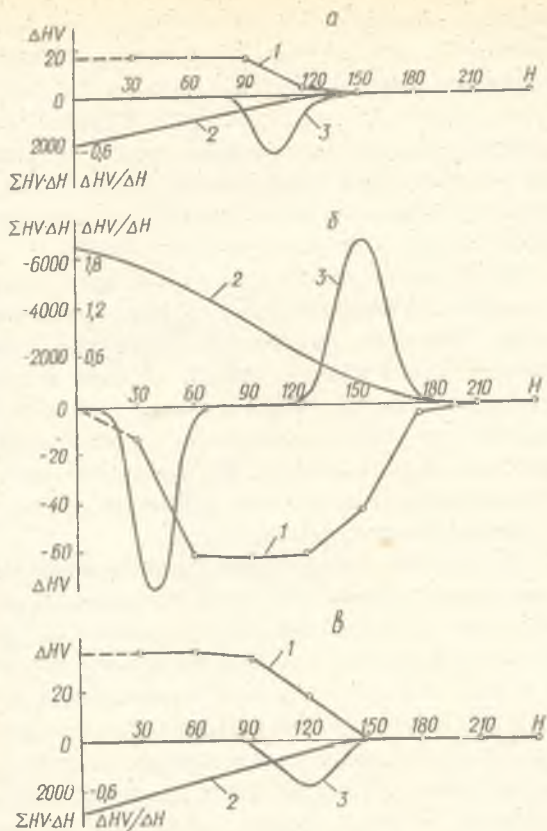


Рис. 3. Микроструктуры наплавки хромоникелевым порошком ПГ-СР4 после ротационного резания с плазменным нагревом недостаточной (а), избыточной (б) и рациональной (в) интенсивности ( $\times 300$ )

Рис. 4. Зависимости твердости  $\Delta HV$  (1), общего упрочнения  $\Sigma HV \Delta H$  (2) и скорости изменения упрочнения  $\Delta HV / \Delta H$  (3) от глубины  $H$  поверхностного слоя наплавки хромоникелевым порошком ПГ-СР4 после ротационного резания с плазменным нагревом недостаточной (а), избыточной (б) и рациональной (в) интенсивности.  $H$ , мкм

Мора [34], при различных значениях коэффициента  $\chi = \sigma_0^+ / \sigma_0^-$  в зависимости от температуры нагрева:

$$\sigma_e = (1 - \chi) (\sigma_z + \sigma_y) / 2 + (1 + \chi) \sqrt{(\sigma_z - \sigma_y)^2 / 4 + \tau_{zy}^2} .$$

Затем по температурам  $T$  контактных площадок  $l$ ,  $h$  и поверхностей инструмента и детали определялись температурные поля (рис. 2, в) в инструменте, срезаемом и поверхностном слоях детали.

Для обрабатываемого материала температура в текущей точке с координатами  $(z, y)$  рассчитывалась методом тепловых источников [35]. Тепловое поле от быстро движущегося со скоростью  $v$  равномерно распределенного источника интенсивностью  $q$ , длиной  $l$  и шириной контакта  $B$  для полупространства описывалось выражением [36]

$$T = \exp[-(az)^2] \left\{ \left( \operatorname{erf}[a(l+y)] + \operatorname{erf}[a(l-y)] \right) \right\} q \omega a / (\sqrt{\pi} \lambda v) ,$$

$$a = \sqrt{v / (4 \omega B)} .$$

В режущем клине температура в текущих точках (рис. 2, в) определялась для четверти пространства суперпозицией от источников на передней и задней поверхностях инструмента [36].



В завершение результаты расчетов полей напряжений и температурных полей сравнивались с распределением микроструктур (рис. 3) и твердости  $HV$ , поверхностного слоя по глубине  $H$  (рис. 4). Проводилось также сравнение с общим упрочнением  $\Sigma HV \cdot \Delta H$  по всей глубине, определяемым графическим интегрированием зависимости  $\Delta HV$  от  $H$  и с изменением упрочнения  $\Delta HV / \Delta H$  при углублении в поверхностный слой, определяемым графическим дифференцированием.

*2.2. Результаты и обсуждение.* Полученные поля напряжений и температур показывают, что при совместном действии высоких динамических и температурных нагрузок в результате сложных термомеханических процессов в срезаемом припуске должны формироваться новые особенности в кинетике стружкообразования, изменяться виды износа и разрушения режущего лезвия инструмента, а в поверхностном слое покрытия на глубине до 0,2...0,3 мм могут образовываться структуры, обеспечивающие упрочненные детали.

Исследования стружкообразования показывают, что дополнительный плазменный электродуговой нагрев переводит обрабатываемый материал в более пластичное состояние и вместо стружки скалывания, образующейся в результате опережающей трещины в материале, при обработке хромоникелевых порошковых наплавов ПГ-10Н-01 и ПГ-СР4 формируется суставчатая стружка. При обработке с предварительным нагревом дополнительное перемещение режущего лезвия ротационного инструмента не позволяет заторможенным объемам обрабатываемого материала, образованным в результате термодформационного упрочнения пластичного обрабатываемого материала застойными диссипативными структурами, закрепиться в виде наростов [37] у режущей кромки. Это обеспечивает стабильное формирование стружки при обработке наплавов стальными проволоками Нп-30ХГСА и Нп-65Г. Высокая интенсивность нагрева, при которой даже дополнительное перемещение лезвия ротационного инструмента не обеспечивает необходимый теплоотвод, создает большую температуру в узкой локализованной зоне наиболее интенсивных деформаций, дальнейший рост которой приобретает взрывной характер и вызывает разрушающие термопластические сдвиги [38], формирующие ступенчатую стружку.

Стойкостные испытания твердосплавного инструмента при ротационной обработке с предварительным нагревом показывают, что при нагреве недостаточной интенсивности разрушение лезвия в процессе обработки порошковых наплавов ПГ-10Н-01 и ПГ-СР4 происходит после достижения величины износа по задней поверхности значения 0,15 мм в результате интенсивного микровыкрашивания. В процессе обработки наплавов проволоками Нп-30ХГСА и Нп-65Г разрушение происходит после износа величиной 0,3 мм (рис 2, б) в результате термоусталостных трещин, образующихся из-за высокой амплитуды термических циклов при вращении инструмента. Плазменный нагрев рациональной интенсивности снижает амплитуды термических циклов вследствие повышения температуры в результате накопления тепла режущей пластиной в первые секунды работы, увеличивает длину контакта стружки по передней поверхности в 2...3 раза и снижает контактные напряжения на рабочих поверхностях лезвия. Допустимый износ при этом достигает 0,7 мм (рис 2, в), а разрушение происходит в результате потери прочности режущим лезвием.

В процессе ротационной обработки с нагревом недостаточной интенсивности волнистость  $S_m$  1,2 мм и шероховатость  $Ra$  8 мкм высоки, так как поверхность сохраняет следы разрушений при формировании стружки ска-

львания, твердость  $58 HRC_3$  и степень упрочнения  $\mu$  импульсной динамической нагрузки при автоколебаниях ротационного инструмента малы и неравномерны, глубина упрочнения  $H$  невелика (рис. 3, а; 4, а, кривая 1). При нагреве рациональной интенсивности волнистость  $Sm$  0,7 мм и шероховатость  $Ra$  3 мкм существенно снижаются, твердость  $63 HRC_3$  и степень упрочнения  $\mu = 3,0\%$  заметно возрастают вследствие термомодеформационного упрочнения пластичного поверхностного слоя в результате завальцовывания пор, дробления зерен и формирования определенной текстуры, глубина упрочнения при этом увеличивается (рис. 3, в; 4, в, кривая 1). В случае избыточного нагрева волнистость  $Sm$  1,1 мм и шероховатость  $Ra$  15 мкм достаточно велики, так как на поверхности остаются кратеры после оплавления плазменной дугой. Твердость  $53 HRC_3$  и степень разупрочнения  $\mu = -0,8\%$  показывают, что вращающийся инструмент не обеспечивает деформационного упрочнения терморазупрочненному поверхностному слою даже до первоначального состояния, на глубину  $H$ , небольшую по сравнению с зоной термического влияния (рис. 3, б; 4, б, кривая 1).

Изучение последовательности воздействий тепловых и механических потоков энергии, анализ кинетики процесса и качества формируемой поверхности указывают на целесообразность исследования технологическо-эксплуатационной наследственности [7, 8] термодинамически неустойчивых диссипативных структур в процессах комбинированной обработки.

Исследование тепловых и механических потоков в поверхностном слое показало, что концентрированный нагрев разупорядочивает поверхностный слой за счет роста зерна и растворения боридных и карбидных фаз в  $\gamma$ -твердом растворе никеля. Глубина фазовых превращений определяет границу распространения теплового потока (рис. 3, б). Ротационный инструмент срезает дефектный слой и упрочняет поверхность накаткой, завальцовывая трещины, поры, измельчая зерно. Механические воздействия также проникают на определенную глубину (рис. 3, б, в).

Когда импульс энергии передается обрабатываемой поверхности, скорость и ускорение распространения энергии отражается на всех участках прохождения импульса. Так, о скорости распространения можно судить по распределению значений упрочнения  $\Delta HV$  по глубине  $H$  поверхности (рис. 4, кривые 1). Тогда величина энергии импульса будет определяться площадью, расположенной под кривой упрочнения, которую можно определить графическим интегрированием ( $\Sigma HV \cdot \Delta H$ ) (рис. 4, кривые 2). Ускорение при прохождении импульса можно определить графическим дифференцированием ( $\Delta HV / \Delta H$ ) кривой упрочнения (рис. 4, кривые 3). Результаты дифференцирования описывают глубину проникновения импульса, следовательно, вторую производную от импульса энергии, характеризующую величину и положение силы, которая тормозит поток энергии в поверхностном слое, можно определить как технологический барьер.

Технологические барьеры (рис. 4, кривые 3) достаточно точно описываются нормальным законом распределения. При упрочнении и разупрочнении барьеры располагаются по разные стороны от оси абсцисс.

При достаточной близости технологических барьеров в результате предварительного нагрева увеличивается пластичность поверхностного слоя и деформации проникают на большую глубину. Увеличение зоны и степени деформации, сопровождающееся усиленным поглощением тепла, препятствует прохождению теплового потока и приближает границу его распространения к поверхности. В результате кооперативное действие механических и

тепловых потоков приводит к совмещению технологических барьеров и по всей глубине воздействия происходят термомеханические процессы.

Необходимо отметить, что термомеханические процессы стабильны, когда имеется возможность диссипации избытка энергии при формировании поверхности. В частности, для тепловых потоков диссипация происходит при фазовых переходах, в момент, предшествующий образованию канавки проплавления, а для механических потоков она обеспечивается ротационным инструментом с дополнительной степенью свободы движения режущего лезвия. При этом целесообразно, чтобы стабилизировался процесс комбинированной обработки, так как термодинамически неустойчивые структуры в зоне стружкообразования могут изменить направление диссипации механических и тепловых потоков и тем самым повлиять на процесс формирования поверхности.

### Выводы

1. Изменения начальных условий, таких, как предварительный нагрев для разупрочнения срезаемого слоя и деформирование для термомеханического упрочнения поверхностного слоя, требуют соответствующих изменений граничных условий путем дополнительных перемещений лезвия инструмента и движения теплового источника с определенной скоростью, меняющих положение границ распространения механических воздействий и тепловых потоков.

2. Граничные условия можно представить как положения технологическо-эксплуатационных барьеров, начальные условия – как величину площади этих барьеров, а сами барьеры определять как вторую производную от импульса воздействия тепловой, механической или другой энергии по времени или глубине проникновения.

3. Для создания технологическо-эксплуатационных барьеров необходимы особые наследуемые структуры, которые бы диссипировали энергию, по возможности сохраняя начальные и граничные условия, обеспечивая тем самым процессам формирования и эксплуатации поверхности приближение к адиабатическим условиям.

### Обозначения

$\Phi$  – количество фаз (структур);  $K$  – число компонентов;  $\Pi$  – количество переменных налагаемых полей (потоков энергии);  $C$  – число степеней свободы системы;  $F$  – свободная энергия системы;  $U$  – внутренняя энергия;  $T$  – абсолютная температура;  $\epsilon$  – энтропия;  $Z$  – термодинамический потенциал;  $H'$  – энтальпия;  $\Psi$  – функция диссипации;  $\sigma$  – производство энтропии;  $\tau$  – время;  $V_1$  и  $V_2$  – объем заготовки и детали;  $U_0$ ,  $U_1$  и  $U_2$  – интенсивности приработки, износа и разрушения;  $\delta$  – точность обработки поверхности;  $q$  – плотность мощности источника;  $t$  – глубина резания;  $S$  – скорость подачи;  $v$  – скорость главного движения и нагрева;  $I$  – сила тока электрической дуги;  $L$  – расстояние от пятна нагрева на поверхности детали до режущего участка лезвия инструмента;  $v_r$  – скорость вращения ротационного инструмента;  $P_z$ ,  $P_y$  и  $P_x$  – составляющие силы резания;  $l$  и  $h$  – длины контактных площадок на передней и задней поверхностях инструмента;  $B$  – ширина контактных площадок;  $k$  – усадка стружки;  $x$ ,  $y$  и  $z$  – координаты текущей точки;  $\sigma_z$  и  $\sigma_y$  – нормальные напряжения;  $\tau_{zy}$  – касательные напряжения;  $\Theta$  – полярная координата текущей точки;  $g(\Theta)$  – распределение контактных нагрузок;  $\sigma_\epsilon$  – эквивалентные напряжения;  $\chi = \sigma_0^* / \sigma_0^-$  – коэффициент в универсальных критериях прочности;  $\sigma_0^*$  и  $\sigma_0^-$  – напряжения предельные для материала при одноосном растяжении и сжатии;  $\omega$  и  $\lambda$  – коэффициенты теплопроводности и теплопроводности;  $Sm$  и  $Ra$  – волнистость и шероховатость

поверхности;  $HRC_3$  и  $HV$  – твердость поверхности по Роквеллу и Виккерсу;  $\mu = \Delta HV/HV$  – степень упрочнения поверхностного слоя;  $H$  – глубина упрочненного слоя.

## Литература

1. Хейфец М. Л. // Вестн. машиностроения. 1994. № 2. С. 22–25.
2. Ящерицын П. И., Борисенко А. Э., Попок Н. Н., Хейфец М. Л. // Докл. АН Беларуси. 1992. Т. 36, № 5. С. 429–432.
3. Ящерицын П. И., Деев Г. А., Кожуро Л. М., Хейфец М. Л. // Докл. АН Беларуси. 1993. Т. 37, № 4. С. 114–117.
4. Астапчик С. А., Царев Г. Л., Береза П. А., Чеботько И. С. // Изв. АН БССР. Сер. физ.-техн. наук. 1987. № 2. С. 13–18.
5. Шипко А. А. // Металловедение и термическая обработка металлов. 1987. № 10. С. 45–49.
6. Сенчило И. А., Смирнов А. М., Власов В. Б., Барышников В. В. // Прогрессивные технологические процессы в машиностроении. Л., 1990. С. 40–43.
7. Дальский А. М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин. М., 1975.
8. Ящерицын П. И., Скорышин Ю. В. Технологическая и эксплуатационная наследственность и ее влияние на долговечность машин. Минск, 1978.
9. Древинг В. П. Правило фаз. М., 1954.
10. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах: Введение в теорию диссипативных структур. М., 1979.
11. Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуации. М., 1973.
12. Берже П., Помо И., Видаль К. Порядок в хаосе. О детерминистическом подходе к турбулентности. М., 1991.
13. Подураев В. Н. Технология физико-химических методов обработки. М., 1985.
14. Ящерицын П. И., Борисенко А. В., Хейфец М. Л. // Известия АН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. 1992. № 1. С. 48–53.
15. Надежность и долговечность машин / Б. И. Костецкий, И. Г. Носовский, Л. И. Бершадский, А. К. Караулов. Киев, 1975.
16. Марков А. И. Ультразвуковая обработка материалов. М., 1980.
17. Каллюпин В. В. Механика волны при резании. Минск, 1969.
18. Теоретические основы процессов поверхностного деформирования / Под ред. В. И. Беляева. Минск, 1988.
19. Ящерицын П. И., Борисенко А. В., Дривотин И. Г., Лебедев В. Я. Ротационное резание материалов. Минск, 1987.
20. Коновалов Е. Г., Чистосердов П. С., Фломенбит А. И. Ротационная обработка поверхностей с автоматической подачей. Минск, 1976.
21. Теория сварочных процессов / Под ред. В. В. Фролова. М., 1988.
22. Ширшов И. Г., Котиков В. Н. Плазменная резка. Л., 1987.
23. Рыкалин Н. Н., Зуев И. В., Углов А. А. Основы электронно-лучевой обработки материалов. М., 1978.
24. Григорьянц А. Г. Основы лазерной обработки материалов. М., 1989.
25. Copley S., Bass M., Jan V., Wallance R. J. // Laser Materials Processing. North-Holland Publishing Company, 1983. P. 229–336.
26. Обработка металлов резанием с плазменным нагревом / Под ред. А. Н. Резникова. М., 1986.
27. Углов А. А., Огороков Л. В., Смуров И. Ю., Дерябин А. Г., Волков А. А. // Вестн. машиностроения. 1990. № 11. С. 34–38.
28. Ашкинази В. М. Упрочнение и восстановление деталей машин электрохимической обработкой. М., 1989.
29. Кершенбаум В. Я. Механотермическое формирование поверхностей трения. М., 1987.

30. **Белый А. В., Макушок Е. М., Поболь И. Л.** Поверхностная упрочняющая обработка с применением концентрированных потоков энергии. Минск, 1990.
31. **Хан Х.** Теория упругости. Основы линейной теории и ее применение. М., 1988.
32. **Борисенко А. В., Хейфец М. Л.** //Изв. АН БССР. Сер. физ.-техн. наук. 1990. № 1. С. 117.
33. **Hetyenyi M.** //Journal of applied Mechanics. 1960. Vol. 27, N. 2. P. 289-296.
34. **Справочник по сопротивлению материалов/Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев.** Киев, 1986.
35. **Рыкалин Н.Н.** Расчеты тепловых процессов при сварке. М., 1951.
36. **Резников А.Н.** Теплофизика процессов механической обработки материалов. М., 1981.
37. **Кабалдин Ю. Г., Медведева О. И.** //Вестник машиностроения. 1989. № 5. С. 37-39.
38. **Талантов Н.В.** //Физические процессы при резании металлов. Волгоград, 1984. С. 3-37.

*Полоцкий государственный университет,  
г. Новополоцк,*

*Поступила 21.09.94.*

*Белорусский аграрный технический университет,  
г. Минск,*

*Институт надежности и долговечности машин  
АН Беларуси, г. Минск*

*Санкт-Петербургский государственный  
технический университет*