

Погодаев Л. И., Кузьмин А. А., Богданова Н. В.

Анализ структурно-энергетической модели стойкости режущих инструментов при обработке наплавов с мартенситной структурой и газотермических покрытий

В свое время в Ленинградском институте водного транспорта была разработана серия Cr-Mn сталей перлитного и мартенситно-аустенитного классов, предназначенных соответственно для изготовления деталей центробежных грунтовых насосов и лопастей судовых движителей, в частности сталь 30X4Г2МТ [2, 3, 6, 8]. На основании этих разработок в ИЭС им. Е. О. Патона было освоено производство порошковой проволоки ПП-Нп-30X4Г2М. Упрочнение и восстановление деталей наплавкой указанной порошковой проволокой реализовано на практике: в металлургическом производстве и в машиностроении при восстановлении опор качения [4, 8]. Поскольку металл, наплавленный ПП-Нп-30X4Г2М, имеет мартенситную структуру (50...52 HRC), то выявление закономерностей обработки резанием наплавленных деталей, а также оценка стойкости инструментов, оснащенных традиционными твердыми сплавами и новыми инструментальными материалами (комполит-10, киборит и др.), представляет значительный научный и практический интерес.

На основании структурно-энергетического подхода исходная модель долговечности инструментов при изнашивании по задней поверхности может быть представлена в следующем виде:

$$T_i = \omega^{-1} \{ [h]_{3П} / h_0 \}^{1/m} \{ \zeta_2 t_p \operatorname{scos} \gamma / [\sin \Phi \cos(\Phi - \gamma)]_{\text{отн}}^* \times [E_{уд} * v_{kp} / E_i v_{рез}] \}^{n_i}, \quad (1)$$

где ω - частота внешнего нагружения некоторого фиксированного участка на изнашиваемой поверхности инструмента в течение аккумуляционного периода накопления повреждений τ_{ak} ; $[h]_{3П}$ - допускаемый линейный износ инструментов, определяемый, например, при чистовой обработке шириной фаски износа по задней поверхности; h_0 - линейный износ инструментов за период времени, равный $2\tau_{ak}$; m - показатель степени при времени t в кинетических зависимостях износа инструментов

$h(t)$; коэффициент $\zeta_2 \cong 1,54$ при изнашивании по задней грани; второй множитель правой части формулы (1) представляет собой отношение критической плотности мощности резания к ее текущему (амплитудному) значению; t_p и s - глубина резания и подача;

Φ - угол сдвига (скалывания) срезаемого материала; γ - передний угол резца; $E_{уд}^*$ и $v_{кр}$ - осредненная в изнашиваемых объемах инструментального материала (* - знак осреднения) удельная энергия разрушения и соответствующая критическая скорость резания (деформирования), реализуемые при однократном внешнем нагружении; E_i и $v_{рез}$ - плотность энергии внешнего воздействия на изнашиваемые слои инструментов и скорость резания соответственно; n_i - показатель степени, учитывающий особенности разрушения (изнашивания) инструментов при циклическом внешнем нагружении на различных масштабных уровнях.

Если износ инструментов по задней поверхности рассматривать в связи с суммарной мощностью резания, то зависимости $T_i(\Phi)$ и $T_i(\delta)$ должны иметь максимум при наименьшей мощности резания и оптимальных углах сдвига Φ^{opt} и резания δ^{opt} .

В соответствии с (1) долговечность инструментов должна увеличиваться: с уменьшением h_0 , m , s и плотности потока мощности $E_i v_{рез}$. В то же время увеличение энергоемкости материала инструмента $E_{уд} v_{кр}$ должно приводить к росту его стойкости.

Поскольку характеристики h_0 и m при резании одним и тем же инструментом, т. е. при $E_{уд} * v_{кр} = const$, зависят прежде всего от мощности резания, то скорость изнашивания $v_{изн}$ и стойкость T_i будут прежде всего определяться скоростью резания и подачей, т. е. параметрами, наиболее существенно влияющими на температуру резания. При обработке деталей инструментами, изготовленными из различных материалов, стойкость резцов при $E_i v_{рез} = const$ будет зависеть от соотношения $[E_{уд} * v_{кр} / E_i v_{рез}]^{n_i}$, а также от геометрии режущей части (от переднего угла γ или от угла резания δ) и от особенностей трибоконтакта задней поверхности инструмента с поверхностью заготовки (удельного давления q , коэффициента трения $f_{тр}$ и пр.).

Анализ кинетических зависимостей износа резцов, оснащенных твердым сплавом ВК8, композитом 10 и киборитом, при обтачивании заготовок с газотермическими покрытиями типа ПГ-10Н-01 и ПГ-СРЗ (45...55 HRC) указывает на более высокую стойкость сверхтвердых поликристаллических материалов в сравнении со стойкостью твердого сплава. При этом износ резцов во времени соответствует степенной зависимости

$$h_{\text{зп}} = \text{const}_1 t^n, \quad (2)$$

где показатель степени n изменяется в пределах от 0,42 до 1,0 и может свидетельствовать о преобладании абразивного и адгезионного изнашивания при $n = 1$ и диффузионного изнашивания при $n = 0,42 \dots 0,5$.

По результатам исследований, приведенным в работе [1], изнашивание композита 10 и киборита может быть результатом химического взаимодействия поликристаллических инструментальных материалов на основе кубического нитрида бора (КНБ) со срезаемым материалом и окружающей атмосферой с образованием в зоне трибоконтакта жидких (B_2O_3) и газообразных продуктов.

Повышенную стойкость резцов с КНБ в сравнении со стойкостью резцов с твердым сплавом можно связать также со значительным (примерно в 2 раза) снижением плотности мощности трения $f_{TP} q v_{кр}$ в первом случае вследствие перехода от сухого трения к трению при граничной смазке за счет образования жидкой фазы в зоне трибоконтакта [8].

Отмеченная благоприятная для стойкости инструмента особенность обработки материалов и покрытий резцами, оснащенными КНБ, тем не менее, не защищает инструменты от интенсивного изнашивания при ужесточении условий резания. Переход от сравнительно мягких режимов резания к средним (при $v_{рез} \geq 2$ м/мин) сопровождается резким увеличением скорости изнашивания резцов.

Если скорость изнашивания резцов в зависимости от $v_{рез}$, представить степенной функцией

$$v_{\text{изн}} = \text{const}_2 v_{\text{рез}}^n, \quad (3)$$

то при мягких, средних и жестких режимах резания, как это следует из углубленного анализа исходного соотношения (1), показатель степени n принимает значения соответственно: 2,25; 4,5 и 9,0.

Поскольку $T_i \sim v_{\text{изн}}^{-1}$, то зависимости $T_i v_{рез}$ при различных подачах в координатах с логарифмическими шкалами будут также представлять собой совокупность кривых с характерными изломами при $v_{рез}$, соответствующих смене масштабов нагружения и основных видов изнашивания, а именно:

$$T_i = (const_3)_{si} / (v_{рез})^n, \quad (4)$$

где $n \cong 1,10; 1,40; 2,0$ и $2,5$ для верхних и $n \cong 4,0$ для нижних участков кривых $T_i(v_{рез})$ при подачах, равных соответственно: $0,3; 0,23; 0,17$ и $0,04$ мм/об; $(const_3)_{si}$ - опытные константы, принимающие восемь различных значений при четырех подачах для верхних и нижних отрезков частных зависимостей (4).

Исследования выявили значительное влияние подачи на обрабатываемость резанием наплавов с мартенситной структурой. Зависимости $T_i(s_i)$ при $v_{рез} 2,0$ и $1,5$ м/мин также могут быть аппроксимированы экспоненциальными функциями:

$$T_i = const_6 [\exp(-const_7 s_i)], \quad (5)$$

Сравнивая зависимости стойкости инструментов от скорости резания и подачи, нетрудно сделать вывод о том, что резкое снижение стойкости инструментов, связанное с переходом от одной разновидности изнашивания к другой [8], происходит при некоторой постоянной для данных условий обработки мощности резания

$$(1/k)N_{e рез} \sim (s \cdot v_{рез})_1 \cong (s \cdot v_{рез})_2 = \dots = (s \cdot v_{рез})_n = const_8, \quad (6)$$

где k - коэффициент, учитывающий ряд параметров, входящих в исходное соотношение (1).

Можно полагать, что практический результат (6) при $T_i \cong const$ для обработки ГТП характеризует не столько постоянство мощности резания и соответствующей мощности трения, сколько некоторое постоянство температуры резания.

Согласно уравнению (1) при уменьшении угла γ или при увеличении угла резания δ до определенного предела стойкость инструментов должна возрастать. Это связано с уменьшением мощности резания за счет реализации в срезаемом слое менее жесткого напряженного состояния, меньших относительных деформаций и напряжений, а также за счет улучшения отвода тепла из зоны резания в более массивную режущую часть инструмента.

Зависимость $T_i(\delta_i)$, построенная нами по результатам обработки резанием неоплавленных Ni-Al газотермических покрытий, напыляемых на внутреннюю поверхность цилиндрических втулок судовых двигателей, согласуется с теоретической

моделью (1), поскольку ее характер однозначно отражает затраты мощности на образование стружки, минимальные при максимальной стойкости резцов и наоборот.

Хрупкое разрушение пористых ГТП связано с их микроструктурной неоднородностью: присутствием нерасплавленных частиц, неодинаковой когезионной прочностью отдельных конгломератов в сечении покрытий, наличием остаточных напряжений и пор, играющих роль микротрещин и т.п. Перечисленные отрицательные факторы приводят к дроблению (рассыпанию) пористых покрытий при резании (деформировании) их тупыми резцами, создающими в срезаемых объемах более жесткое напряженное состояние (сдвиг) в сравнении с менее напряженным состоянием (сжатием) в случае обработки ГТП острыми резцами.

Следует отметить, что резание ГТП резцами с большими углами δ_i , снижая энергозатраты на обработку и увеличивая стойкость инструментов, оставляет одновременно на обработанной поверхности дефектный слой толщиной, равной примерно глубине резания. В связи с этим можно полагать, что износостойкость деталей с неоплавленными ГТП после окончательной обработки резцами с большими углами резания, т. е. с отрицательными передними углами, будет снижаться пропорционально увеличению δ_i , или уменьшению γ_i .

Сравнительные стойкостные испытания девяти марок инструментальных материалов при обтачивании стержней, наплавленных ПП-Нп-ЗОХГ2МТ, выявили подавляющее преимущество резцов, оснащенных киборитом. Стойкость резцов с киборитом оказалась выше стойкости резцов, оснащенных твердым сплавом Т5К10, примерно в 50 раз.

Испытания показали, что отношение твердости инструментов к твердости заготовки H_n/H_3 , в одинаковых условиях резания может служить достаточно надежным критерием относительной стойкости инструментальных материалов. Экспериментально установленная зависимость

$$T_{отн} = \text{const}_{11} (H_n/H_3)^{n^*}, \quad (7)$$

характеризуют масштабные уровни изнашивания и жесткость условий резания.

Попытки получить стойкостную зависимость, аналогичную формуле (7) при обработке резанием одним и тем же инструментом ($H_n = \text{const}$), более широкого круга материалов с различной структурой и твердостью могут оказаться менее успешными по той причине, что изнашивающее воздействие обрабатываемых материалов на инструмент

не в меньшей степени, чем от твердости зависит также и от особенностей микроструктуры. Так, например, стойкость инструмента при обработке закаленной стали 45 (45 ИКС) и наплавки 25ХФМС (43 ИКС) окажется существенно различной. Вследствие присутствия в структуре наплавленной стали карбидов ванадия стойкость инструментов при ее обработке снизится примерно в два раза. Такое заключение следует из анализа многочисленных опытных данных по обработке резанием широкого круга материалов, обладающих различной износостойкостью. В большинстве случаев стойкость инструментов снижается обратно пропорционально относительной износостойкости обрабатываемых материалов при истирании $k_{\Delta V}$, т. е.

$$T_{\text{отн}} \sim 1 / (k_{\Delta V})^n, \quad (8)$$

где $n = 1 \dots 4$ в зависимости от степени соответствия условий резания условиям изнашивания.

Анализ износостойкости и обрабатываемости резанием стали 30Х4Г2МТ на основании структурно-энергетического подхода впервые выполнен Л. И. Погодаевым [2, 3, 6, 8]. При обтачивании рабочих колес грунтовых насосов из стали 30Х4Г2МТ с различной термообработкой в условиях прерывистого резания с ударами наименьшая стойкость инструмента, оснащенного твердым сплавом ВК8, наблюдалась при обработке литых деталей, отпущенных при температуре 400 °С. В условиях ударно-абразивного изнашивания сталь 30Х4Г2МТ показала наибольшую износостойкость после закалки, и последующего отпуска при 450 °С, т.е. оказалось, что $(T_{\text{отн}})^{\text{min}} \sim (k_{\Delta V})^{\text{max}}$. В связи с этим очевидна практическая важность соотношения (8), позволяющего во многих случаях ряды относительной износостойкости материалов трансформировать в ряды относительной стойкости режущих инструментов. Ниже сопоставлены ряды относительной износостойкости наплавки при ударно-абразивном изнашивании и относительной стойкости инструментов, оснащенных твердым сплавом ВК8, в условиях прерывистого обтачивания рабочих колес грунтовых насосов 3ГМ-2М земснарядов.

Таблица

Материал	$k_{\Delta V}$	$T_{\text{отн}}$	Материал	$k_{\Delta V}$	$T_{\text{отн}}$
30Х4Г2МТ (улучшение)	1,0	1,0	ПП-Нп 300Х25РТ	1,68	2,7
Наплавка электродами Т-590	1,42	1,8	ПП-Нп 70Х20РЗ	2,9	8,5
ПП-Нп 350Х20Г5Т	1,45	2,1	ПП-Нп 50Х20РЗФТ	3,1	8,6

Сопоставление значений $T_{отн}$ с $k_{\Delta V}$ в таблице указывает на существование между ними квадратичной зависимости, т. е. показатель степени n в (8) близок к двум. Наличие корреляции между $T_{отн}$ и $k_{\Delta V}$ может послужить основой для разработки оперативной методики оценки относительной стойкости инструментов при резании труднообрабатываемых материалов и покрытий по результатам ускоренных испытаний последних на износостойкость в условиях, близких к условиям изнашивающего воздействия на инструменты материала заготовки. Для получения достоверных результатов необходимо, прежде всего, достижение адекватности масштабных уровней нагружения и температурных условий на поверхностях трибосопряжений.

Частные теоретические зависимости плотности мощности резания от углов резания и сдвига (U-образные кривые), вытекающие из основного уравнения (1), имеют экстремумы при 45° и 38° соответственно. При этом $\Phi^{opt} = 45^\circ$ проявляется на зависимости, учитывающей только плотность мощности сдвига в условной плоскости сдвига, а $\Phi^{opt} = 38^\circ$ имеет место на зависимости, учитывающей не только мощность сдвиговых деформаций, но и плотность мощности трения стружки по передней поверхности режущей части инструмента.

Экспериментальная зависимость стойкости резцов от угла резания, построенная по результатам стойкостных испытаний токарных резцов, оснащенных пластинками твердого сплава ВК8, при обтачивании цилиндрических заготовок с ГТП ПН85Ю15 ($HV = 2310$ МПа и общей пористостью 9,1%) показала, что наибольшая стойкость резцов наблюдается при $\delta_i = 96^\circ$ ($\gamma = -6^\circ$) и соответствует $\Phi^{opt} = 43^\circ$ на теоретической кривой. Последнее обстоятельство указывает на то, что при обработке резанием покрытия ПН85Ю15 примерно 90% мощности резания расходуется в условной плоскости сдвига и только 10% идет на преодоление трения стружки по передней поверхности инструмента, т. е. преобладает хрупкое разрушение срезаемого слоя с образованием стружки надлома. Если для покрытия ПН85Ю15 с $HV = 2300$ МПа $\delta_i^{opt} = 96^\circ$ ($\gamma = -6^\circ$), то для более твердого и более хрупкого покрытия ПГ-10Н-01, имеющего твердость 45...50 HRC и деформацию разрушения при сжатии $\varepsilon \cong 0,08$, угол резания δ_i^{opt} достигает 110° ($\gamma = -10^\circ$).

Важную для практики зависимость стойкости резцов от мощности резания (для $v_{рез} \leq 60$ м/мин), можно представить степенной функцией [7].

$$T_i = \text{const}_{12} / (N_e^{отн})^{n_i} \quad (9)$$

Выполненный авторами анализ и полученные частные соотношения подтверждают

эффективность оценки стойкости режущих инструментов на основе структурно-энергетического подхода, представленного в настоящей работе исходной теоретической моделью (1).

Интерес для практики представляет выбор оптимальных значений параметров режимов резания с учетом не только стойкости инструментов, но и относительных экономических затрат на обработку заготовок с газотермическими покрытиями и наплавками повышенной твердости. Опыт обработки резанием деталей игольчатого подшипника, восстановленного наплавкой стали 30X4Г2МТ (52 HRC) показывает, что наиболее существенно на износ по задней поверхности резцов из киборита влияет не $v_{рез}$, а подача s . В то же время себестоимость обработки резанием восстановленной обоймы подшипника существенно зависит как от $v_{рез}$, так и от s .

Если за критерий оптимизации принять относительную себестоимость обработки резанием одной полностью восстановленной обоймы подшипника $\mathcal{E}^{отн}$, то для произведения $v_{рез}s \leq (v_{рез}s)_{опт}$ на основании частных соотношений окажется справедливой зависимость

$$\mathcal{E}^{отн} = 0,16 h_{зп} / v_{рез}^{0,45} s^{0,65}. \quad (10)$$

При ужесточении условий резания, т. е. при $v_{рез}s \geq (v_{рез}s)_{опт}$, относительная экономическая эффективность растачивания наплавленных деталей будет лимитироваться стойкостью инструментов, оснащенных киборитом, в частности: линейной зависимостью

$$\mathcal{E}^{отн} \cong 0,38 h_{зп}. \quad (11)$$

Практическая ценность результатов (10) и (11) заключается в возможности оценки относительной себестоимости обработки резанием восстановленных деталей при отклонении параметров режимов резания, представленных в виде произведения $v_{рез}s$ в большую или в меньшую сторону от оптимального, равного в рассматриваемых условиях

$$(v_{рез}s)^{опт} \cong 2,15 \times 0,12 \text{ м/мин} \times \text{мм/об}.$$

Результаты выполненного анализа свидетельствуют о целесообразности оценки стойкости инструментов при обработке пористых ГТП и наплавки с мартенситной структурой с помощью структурно-энергетических моделей изнашивания, учитывающих: геометрию режущей части инструментов, особенности деформации срезаемого материала

в условной плоскости сдвига, уровень внешнего нагружения инструментов, представленный плотностью мощности резания и противоизносные свойства инструментальных материалов в виде критической плотности мощности резания.

Показана высокая эффективность резания труднообрабатываемых материалов и покрытий инструментами, оснащенными поликристаллическими сверхтвердыми элементами на основе кубического нитрида бора.

Литература

1. Клименко С. А., Муковоз Ю. А., Полонский Л. Г., Мельничук П. Л. Точение износостойких защитных покрытий. Киев: Техника, 1997. -146 с.
2. Погодаев Л. И., Клименко В. М. Хромомарганцевые стали для деталей, работающих при ударном износе и кавитационной эрозии // МиТОМ, 1973. № II. - С. 35-43.
3. Погодаев Л. И., Лукин Н. В. Режимы работы и долговечность деталей землесосных снарядов. - М.: Транспорт, 1990. - 192 с.
4. Гавриш В. А., Юзвенко Ю. А. О неоднородном износе наплавленного материала в условиях гидроабразивного износа // Теоретические и технологические основы наплавки. Свойства и испытания наплавленного металла: Сб. науч. тр. - Киев: ИЭС АН УССР, 1979. - С.126-131.
5. Клименко С. А., Муковоз Ю. А. Технологическое управление приработкой наплавленных деталей при трении качения //Качество поверхностного слоя и эксплуатационные свойства деталей машин: Сб. науч. тр. - Киев: ИСМ АН УССР. 1987. - С. 26-31.
6. Погодаев Л. И., Голубев Н. Ф. Теория и практика прогнозирования износостойкости и долговечности материалов и деталей машин. - СПб.: СПГУВК, 1997. - 415 с.
7. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975, 344 с.
8. Погодаев Л. И., Кузьмин В. Н. Структурно-энергетические модели надежности материалов и деталей машин. С.-Петербург: Академия транспорта РФ, 2006, 608 с.