

УДК 621.91.01

ОПТИМИЗАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТОНКОГО ТОЧЕНИЯ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ ИНСТРУМЕНТАМИ ИЗ СТМ THE OPTIMIZATION MODEL OF THE PROCESS OF FINE TURNING OF HEAT-RESISTANT ALLOYS BY TOOLS MADE FROM STM

В. А. Белозёров
V. A. Belozerov

Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень

Ключевые слова: точение; станки с ЧПУ; контактные напряжения; оптимизационная модель
Key words: turning operation; NC-machining technique; contact stresses; optimizational model

Разработанная нами термомеханическая модель тонкого точения жаропрочных сплавов и сталей резцами СТМ на станках с ЧПУ, гибких производственных модулях (ГПМ) и обрабатывающих центрах основывается на экспериментальных исследованиях. В основе этой модели предложен системный термомеханический подход к выбору отечественных и зарубежных марок СТМ для резцов при тонком точении жаропрочных сплавов и сталей [1].

Данная термомеханическая модель позволяет разработать и реализовать в процессе обработки оптимизационную (физическую, тепловую) модель процесса тонкого точения жаропрочных сплавов и сталей инструментами из СТМ. Разработка оптимизационной модели (физической оптимизации) осуществляется с применением графических методов — построения семейства графиков (номограммы) для определения контактных характеристик процесса резания и параметров режима резания (t , s , v_{opt}), имеющих постоянные оптимальные значения по величине.

Прежде чем рассматривать вопросы, связанные с созданием и реализацией оптимизационной модели процесса тонкого точения жаропрочных сплавов инструментами из СТМ, необходимо остановиться на проблемах моделирования процессов и создания физических моделей процессов.

Понятие «моделирование» определяется как замещение одного объекта (оригинала) другим (моделью). Далее необходимо изучение свойств модели. Замещение производится с целью упрощения, удешевления, ускорения изучения свойств оригинала. Первоначально все модели можно разделить на две группы: физические (вещественные, реальные); математические (абстрактные, мыслимые).

Таким образом, моделирование процессов предполагает принятие допущений той или иной степени важности. При этом должен удовлетворяться ряд требований к моделям: адекватность, достаточная точность, целесообразность, экономичность.

Необходимость в методах моделирования возникает в различных ситуациях для экспериментального исследования, всестороннего анализа и прогнозирования прохождения процессов. Важной сферой моделирования является принятие управленческих и проектных решений при исследовании процессов.

Термомеханическая модель является основой для создания оптимизационной модели процесса тонкого точения жаропрочных сплавов и сталей резцами из СТМ, имеющих низкие пределы прочности на растяжение.

Реализация термомеханической модели процесса тонкого точения жаропрочных сплавов и сталей инструментами из СТМ позволяет решить теплофизические задачи с отличающимися от приведенных в литературных источниках граничными условиями, приближающие расчетные зависимости к реальным контактным процессам тонкого точения жаропрочных сплавов и сталей резцами из СТМ.

Нами поставлена задача: осуществить достаточно обоснованный системный подход к выбору марок СТМ (отечественных и зарубежных) для тонкого точения жаропрочных сплавов на станках с ЧПУ, обрабатывающих центрах и гибких производственных модулях, а также на универсальном оборудовании. Предлагается термомеханический подход к выбору марок СТМ, состоящий в одновременном учете при этом выборе теплофизической характеристики СТМ-коэффициента теплопроводности $\lambda_{\text{ч}}$ и физико-механической характеристики СТМ (характеристики прочности инструментального материала) — предела прочности на

растяжение σ_s . Указанные граничные условия при выборе марок СТМ отличаются от приведенных в литературных источниках.

Термомеханический подход к экспериментальным исследованиям контактных процессов при тонком течении жаропрочных сплавов резцами из СТМ позволяет сделать вывод о том, что наиболее эффективным с точки зрения динамической прочности из трех рассмотренных СТМ (композитов) — эльбора-Р, композита 05ИТ и гексанита-Р — является гексанит-Р, так как за счет перераспределения средних контактных напряжений на передней и задней поверхностях резца из гексанита-Р напряжения q_N , q_F на передней поверхности увеличиваются, а на задней поверхности напряжение q_{N1} уменьшается в 1,1–1,5 раза, и напряжение q_{F1} уменьшается в 1,2–1,64 раза по сравнению соответственно с напряжениями q_{N1} , q_{F1} резца из эльбора-Р в рассматриваемом диапазоне режимов резания. Это связано с влиянием величины коэффициента теплопроводности λ_n гексанита-Р на то, что у гексанита-Р q_N , q_F увеличиваются, а q_{N1} , q_{F1} уменьшаются по сравнению с соответствующими контактными напряжениями у эльбора-Р при тонком течении жаропрочных сплавов.

Нами разработан принцип выбора областей эффективного использования резцов из композитов и СТМ, выпускаемых за рубежом, при обработке различных обрабатываемых материалов. Этот принцип является реализацией термомеханического подхода к выбору марок отечественных СТМ (композитов) и зарубежных СТМ на основе КНБ, предназначенных для тонкого точения жаропрочных сталей и сплавов твердостью HRC35–40, закаленных легированных сталей твердостью HRC35–40 (средняя твердость). Принцип выбора марок СТМ показывает, что наиболее эффективными композитами, выпускаемыми серийно, для тонкого точения жаропрочных сталей и сплавов являются отечественные СТМ: композит 10, композит 10Д, композит 05ИТ, композит 09 (ПТНБ-ИК-1) и зарубежные СТМ на основе КНБ: вюрцин (Япония), сумиборон BN200 (Япония), ДВС-50 (Англия). В соответствии с названием СТМ на основе КНБ вюрцин (Япония) по способу получения, составу и строению кристаллической решетки является аналогом отечественного СТМ на основе КНБ — гексанит-Р, так как эти СТМ являются гексагональными вюрцитоподобными (вюрцитными) модификациями нитрида бора. Также в соответствии с вышеуказанным, вюрцин и гексанит-Р имеют почти одинаковые по величине теплофизические характеристики — коэффициенты теплопроводности (гексанит — $P-\lambda_n=20\frac{Bm}{31\cdot K}$; вюрцин — $\lambda_n=21\frac{Bm}{31\cdot K}$).

Проведенные нами эксперименты показывают, что закаленные до высокой твердости стали эффективно обрабатывают всей гаммой композитов. Но жаропрочные сплавы наиболее эффективно обрабатываются композитами 05ИТ, 10, 10Д. Это связано с тем, что они имеют низкие по величине коэффициенты теплопроводности, что приводит к понижению контактных напряжений на задних поверхностях резцов, стойкость и динамическая прочность этих резцов будет выше, чем у резцов из композитов 01, 02, 03, киборита-1, амборита. Поэтому композиты 01, 02, 03, киборит-1, амборит неэффективны при обработке жаропрочных сплавов. Нами установлено, что при прочих равных условиях наряду с характеристиками прочности определяющее влияние на стойкость и динамическую прочность резцов имеет величина коэффициента теплопроводности выбранной марки СТМ. Кроме того, необходимость применения резцов из композита 05ИТ, композита 09, композита 10, композита 10Д, вюрцина, сумиборона BN200 (Япония), ДВС-50 (Англия) при тонком точении жаропрочных сплавов и сталей твердостью HRC 35–40 (средняя твердость) вызвана необходимостью рационального использования инструментальных СТМ на основе КНБ, резцы из которого имеют высокую стоимость.

Определено, что термомеханический подход к выбору марок СТМ связан не только с особенностями физико-механического и теплофизического взаимодействия обрабатываемых и инструментальных материалов в процессе резания, но основывается на принципах экономической эффективности и целесообразности применения резцов из СТМ.

Таким образом, выбор марок СТМ осуществляется на основании системного термомеханического подхода к исследованию взаимосвязи контактных явлений в процессе резания, то есть анализа физического взаимодействия обрабатываемого и инструментального материалов при тонком точении жаропрочных сплавов резцами из СТМ, и опирается на физические законы этого взаимодействия.

Системный термомеханический подход при выборе марки СТМ для тонкого точения жаропрочных сплавов и сталей обеспечивает выбор марок СТМ не только для существующих отечественных и зарубежных инструментальных СТМ для резцов, но и для вновь создаваемых инструментальных СТМ (отечественных и зарубежных), когда известны величины теплофизической характеристики (коэффициента теплопроводности λ_n) и физико-механической характеристики инструментального СТМ (предела прочности при растяже-

нии σ_{θ}). В этом состоит одно из основных достоинств созданной термомеханической модели процесса тонкого точения жаропрочных сплавов инструментами из СТМ.

Выявленная физическая закономерность системного термомеханического подхода при выборе марок СТМ для обработки жаропрочных сплавов и сталей (на основании созданной термомеханической модели процесса тонкого точения жаропрочных сплавов резцами из СТМ) распространяется, по нашему мнению, на все сочетания обрабатываемых сталей и сплавов с разными видами инструментальных материалов в процессе обработки. Для всех обрабатываемых сталей и сплавов при выборе марки инструментального материала по группам (твердые сплавы группы ВК; твердые сплавы группы ТК; безвольфрамовые твердые сплавы; металлокерамика; минералокерамика и другие инструментальные материалы) необходимо осуществлять системный термомеханический подход, выбирая марку инструментального материала для соответствующей марки обрабатываемого материала (сталей и сплавов) с учетом наименьшей величины теплофизической характеристики (коэффициента теплопроводности $\lambda_{\text{и}}$) и физико-механической характеристики инструментального материала (предела прочности при растяжении σ_{θ}). Такой системный термомеханический подход при выборе марки инструментального материала должен обеспечить перераспределение контактных напряжений и температур на передней и задней поверхностях режущего инструмента в сторону уменьшения контактных напряжений и температур на задней поверхности и за счет этого повышения периода стойкости и динамической прочности этого режущего инструмента.

Проблеме разработки физических моделей разрушения и прочности сменных многогранных пластин из твердых сплавов при обработке жаропрочных сплавов посвящена работа Е. В. Артамонова, Т. Е. Помигаловой, А. М. Тверякова, М. Х. Утешева [2] и другие работы этих авторов. В своих исследованиях при создании физических моделей процессов резания инструментами из СТМ мы опирались на эти работы.

Перед созданием оптимизационной модели процесса тонкого точения жаропрочных сплавов инструментами из СТМ нами определены предпосылки физической оптимизации контактных характеристик одновременно на передней и задней поверхностях инструмента из СТМ.

Проведенные исследования и всесторонний анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что процесс взаимодействия обрабатываемого и инструментального материалов при резании на передней и задней поверхностях инструмента, сопровождаемый стружкообразованием, — это единый контактный деформационный процесс, поэтому коэффициент укорочения стружки K_L , определяемый на передней поверхности инструмента, оказывает влияние не только на контактные характеристики, действующие на передней поверхности инструмента, но и на контактные характеристики, действующие на задней поверхности инструмента, — силы N_1, F_1 , коэффициент трения μ_1 , контактные напряжения σ_{N1}, τ_{F1} .

Анализ показывает, что при плавном росте коэффициента укорочения стружки K_L от 1,14 до 1,48 в процессе тонкого точения сплава ХН62МВКЮ-ВД, HRC38 «острым» резцом из гексанита-Р контактные характеристики на задней поверхности инструмента наиболее резко уменьшаются сила нормального давления N_1 и средние нормальные контактные напряжения q_{N1} . Как известно, режущая часть инструмента является хрупкой, так как пределы прочности на растяжение СТМ составляют $\sigma_p = 240 - 490$ МПа, поэтому одной из главных проблем обработки резанием этими инструментальными материалами является одновременное с регулярным абразивно-механическим износом по задней поверхности разрушение этого инструмента в виде осыпаний и выкрашиваний (иногда сколов) по задней грани, которое носит фактически неконтролируемый вероятностный характер. Это доказывает, что необходимо стремиться к обеспечению постоянства коэффициентов трения μ_1 на задних поверхностях резцов из СТМ в процессе тонкого точения жаропрочных сплавов и сталей.

Предпосылки создания оптимизационной модели и физической оптимизации контактных характеристик (на стадии разработки) таковы.

1) Проведенное нами исследование сил N_1, F_1 средних контактных напряжений q_{N1}, q_{F1} коэффициентов трения μ_1 на задних поверхностях резцов из СТМ от изменений коэффициента укорочения стружки K_L при тонком точении жаропрочных сплавов.

2) Исследования Полетика М. Ф., который указывает на то, что наиболее ярко оказывает влияние коэффициент укорочения стружки K_L на силы на задней грани N_1, F_1 и коэффициент трения μ_1 при $h_3 = 0,03 - 0,04$ мм («острый» резец), то есть сразу после периода приработки реза [3]. Эксперименты показали, что с ростом K_L силы N_1, F_1 увеличиваются.

3) Нами использован метод физической оптимизации Макарова А. Д. [4], и определены скорости резания v_h^{opt} , соответствующие минимальным относительным износам h_{opt} резцов из СТМ.

4) Некрасов Ю. И. пришел к выводу, что при обработке труднообрабатываемых материалов в диапазоне режимов резания «за наростом» сочетания режимов резания, при кото-

рых коэффициент укорочения стружки K_L^{opt} не изменяется, обеспечивают постоянство силового и температурного нагружения режущей кромки и режим поддержания постоянства коэффициента запаса прочности режущей части инструмента ($n_{opt} = const$) [5]. Было доказано, что критериями физической оптимальности на передней поверхности инструмента в зоне контакта являются одновременно постоянные оптимальные коэффициент укорочения стружки K_L^{opt} , температура резания θ_{opt} и средние нормальные контактные напряжения q_N^{opt} . По постоянному оптимальному коэффициенту укорочения стружки K_L^{opt} определяем оптимальную скорость резания v_{KL}^{opt} . При этом оптимальная скорость резания v_{KL}^{opt} оказывается равной скорости резания, соответствующей относительному износу резца по задней поверхности (по Макарову А. Д.) —, то есть $v_{KL}^{opt} = v_h^{opt}$ (так обеспечивается постоянство $K_L^{opt} = const$, $\theta_{opt} = const$ и $q_N^{opt} = const$).

При положении, когда $K_L^{opt} = const$, $\theta_{opt} = const$, $q_N^{opt} = const$, происходит физическая оптимизация процесса резания на передней поверхности режущего инструмента для данного сочетания «обрабатываемый материал — инструментальный материал», то есть данное положение фактически является физическим законом при взаимодействии конкретных обрабатываемого и инструментального материалов. При этом при постоянной глубине резания для различных значений подач получаем соответствующие оптимальные скорости резания $v_{KL}^{opt} = v_h^{opt}$.

Постоянный оптимальный коэффициент укорочения стружки K_L^{opt} и постоянная оптимальная температура резания θ_{opt} являются критериями физического взаимодействия обрабатываемого и инструментального материалов, то есть определяют напряженно-тепловое состояние режущей части инструмента у вершины. K_L^{opt} — это физический критерий деформационных процессов в зоне резания при стружкообразовании, а θ_{opt} — критерий теплофизического взаимодействия обрабатываемого и инструментального материалов.

Проведенные нами исследования показали, что при постоянных оптимальных значениях коэффициента укорочения стружки K_L^{opt} , температуры резания θ_{opt} , средних нормальных контактных напряжениях q_N^{opt} на передней поверхности инструмента из СТМ при разных сочетаниях параметров режимов резания v_h^{opt} (v_h^{opt} — скорости резания, соответствующие минимальному относительному износу h_{opt} резца из СТМ по задней поверхности в результате физической оптимизации процесса по методу А. Д. Макарова) отношения сил на задней поверхности $\frac{N_1}{F_1}$ постоянны, то есть постоянны соотношения

$$\frac{F_1}{N_1} = \frac{q_N^{opt}}{K_L^{opt}} = \mu_1.$$

Кроме того, как указывалось выше, скорости резания $v_{KL}^{opt} = v_h^{opt}$.

В результате выявления предпосылок создания оптимизационной модели процесса тонкого точения жаропрочных сплавов инструментами из СТМ определены области (зоны) физической оптимизации контактных характеристик (и контактных процессов) одновременно на передних и задних поверхностях резцов из эльбора-Р, композита 05ИТ, гексанита-Р при точении сплава ХН62МВКЮ-ВД, HRC38. Обеспечиваются постоянные оптимальные величины K_L^{opt} , θ_{opt} , q_N^{opt} на передних поверхностях резцов из СТМ и постоянные оптимальные коэффициенты трения μ_1 на задних поверхностях резцов из СТМ. Обеспечиваются также постоянные оптимальные скорости резания $v_{KL}^{opt} = v_h^{opt}$ для резцов из СТМ (при постоянных величинах глубины резания t и подачи S).

Благодаря анализу предпосылок физической оптимизации процесса была создана оптимизационная модель управления в процессе тонкого точения жаропрочных сплавов контактными характеристиками одновременно на передней и задней поверхностях инструмента из СТМ.

Физическая оптимизация контактных характеристик процесса резания распространяется не только на переднюю, но и на заднюю поверхность инструмента из СТМ. Это происходит за счет того, что критерий физической оптимальности взаимодействия обрабатываемого и инструментального материалов — постоянный оптимальный коэффициент укорочения стружки K_L^{opt} — управляет не только контактными процессами на передней поверхности инструмента (вместе с θ_{opt} и q_N^{opt}), но и на задней поверхности. $K_L^{opt} = const$ управляет величиной постоянного оптимального коэффициента трения на задней поверхности $\mu_1^{opt} = const$, от величины которого зависят величины силы трения F_1 , силы нормального давления N_1 и средних контактных напряжений на задней поверхности q_{F1} , q_{N1} , то есть обеспечивается также управление постоянством соотношений

$$\mu_1^{opt} = \frac{F_1}{N_1} = \frac{q_{F1}^{opt}}{q_{N1}^{opt}} = const.$$

Таким образом, постоянный оптимальный коэффициент укорочения стружки K_L^{omm} (усадка стружки) — это объединенная (комплексная) характеристика взаимодействия обрабатываемого и инструментального материалов в условиях физической оптимизации процесса, то есть критерий физической оптимизации контактных процессов одновременно на передней и задней поверхностях режущего инструмента.

Разработана блок-схема оптимизационной модели управления в процессе резания контактными характеристиками одновременно на передней и задней поверхностях инструмента из СТМ в условиях физической оптимизации. Оптимизационная модель управления контактными процессами разрабатывается на стадии проектирования операции технологического процесса и реализуется уже во время обработки поверхности детали. Оптимизационная модель представлена в виде семейства графиков, связанных между собой и образующих номограмму управления процессами нагружения одновременно на передней и задней поверхностях инструмента из СТМ, и по этой номограмме определяются постоянные оптимальные контактные характеристики на передней и задней поверхностях инструмента из СТМ, а также оптимизируются параметры режима резания при тонком точении жаропрочного сплава этим инструментом. В соответствии с классификацией физических моделей процессов разработанная нами номограмма оптимизационной модели может быть отнесена к схемной (графической) форме физической модели, так как представление модели произведено на графическом языке (в виде семейства графических зависимостей — номограммы). В результате проведенных исследований сделаны выводы.

- Разработанная оптимизационная модель процесса тонкого точения жаропрочных сплавов инструментами из СТМ в условиях физической оптимизации позволила установить взаимосвязь контактных характеристик и контактных процессов одновременно на передней и задней поверхностях инструмента из СТМ с целью стабилизации контактных характеристик со стороны задней поверхности для режущей части инструмента из СТМ, так как инструментальные СТМ являются хрупкими, то есть имеют низкие по величине пределы прочности на растяжение σ_r .

- Достоинством реализации оптимизационной модели управления процессом нагружения режущей части инструмента из СТМ одновременно на передней и задней поверхностях на основании выявленных естественных физических закономерностей взаимодействия конкретных обрабатываемых и инструментальных материалов в процессе резания является то, что в данном случае нет необходимости в создании сложных приборов и установок для диагностики и контроля параметров процесса резания (контактных характеристик и параметров режимов резания). Процесс контакта обрабатываемого и инструментального материалов при резании происходит в виде самоуправления контактными характеристиками одновременно на передней и задней поверхностях инструмента из СТМ, опирающегося на установленные нами физические закономерности взаимодействия жаропрочного сплава и инструмента из СТМ в процессе обработки.

- В оптимизационной модели управления процессом нагружения одновременно на передней и задней поверхностях режущих частей инструментов из СТМ при тонком точении жаропрочных сплавов и сталей, закаленных легированных сталей на станках с ЧПУ, обрабатывающих центрах и гибких производственных модулях (ГПМ) в условиях экономической оптимизации процесса резания на стадии проектирования операции технологического процесса и во время обработки поверхности детали задействованы критерии: экономический — наибольшая экономическая эффективность обработки поверхности детали (прибыль) — $\mathcal{E}_{max} \frac{M^0}{\phi}$; критерий надежности режущего инструмента — постоянная оптимальная вероятность безотказной работы — $P_3^{omm}, \%$; критерий динамической прочности инструмента — постоянный оптимальный коэффициент запаса прочности режущей части инструмента у вершины — n_{omm} ; критерий физического взаимодействия обрабатываемого и инструментального материалов в процессе резания (обобщенная характеристика напряженно-деформированного состояния в зоне резания) одновременно на передней и задней поверхностях — постоянный оптимальный коэффициент укорочения стружки — K_L^{omm} ; критерий физического взаимодействия обрабатываемого и инструментального материалов в процессе изнашивания и разрушения режущей части инструмента по задней поверхности — постоянный оптимальный коэффициент трения на задней поверхности режущей части инструмента — μ_1^{omm} ; критерий качества обработки поверхности детали $R_a^{omm} (R_z^{omm})$ — постоянная оптимальная высота микронеровностей обрабатываемой поверхности детали — внешний технологический критерий процесса резания (критерий качества обработки поверхности), который в отличие от усадки стружки и температуры резания легче контролировать в процессе резания методами активного контроля при обработке на станке с ЧПУ.

Список литературы

1. Белозёров В. А., Силич А. А., Утешев М. Х. Термомеханическая модель процесса тонкого точения жаропрочных сплавов инструментами из СТМ // Известия вузов. Нефть и газ. – Тюмень. – 2014. – № 4. – С. 91-94.
2. Артамонов Е. В., Помигалова Т. Е., Тверяков А. М., Утешев М. Х. Механика разрушения и прочность сменных режущих пластин из твердых сплавов: под общей ред. М. Х. Утешева. – Тюмень: ТюмГНТУ, 2013. – 148 с.
3. Полетика М. Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента. – М.: Машиностроение, 1969.
4. Макаров А. Д. Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 276 с.
5. Некрасов Ю. И. Исследование технологической эффективности обработки труднообрабатываемых материалов на токарных станках с ЧПУ при управлении процессами нагружения режущей части инструмента: автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. тех. наук. – Киев: ИСМ АН УССР, 1981. – 24 с.

Сведения об авторе

Белозёров Владимир Анатольевич, к. т. н., доцент кафедры «Технология машиностроения», Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)412465, e-mail: belozerov48@mail.ru

Information about the author

Belozerov V. A., Candidate of Sciences in Engineering, associate professor of the chair «Mechanical engineering», Tyumen State Oil and Gas University, phone: 8(3452)412465, e-mail: belozerov48@mail.ru