

И.П. Лебедева, В.Л. Хавин, канд. техн. наук, Харьков, Украина,
А.А. Симонова, канд. техн. наук, Кременчуг, Украина,
Н.В. Верезуб, д-р техн. наук, Харьков, Украина

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ С НАНО- И СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

Запропоновано рішення задачі вибору оптимальних параметрів лезової обробки металів із нано- та субмікросталічною структурою. Описано багатокритеріальна цільова функція та технологічні обмеження. Розглянуто розроблену програму з використанням методу безумовної мінімізації декількох змінних.

Предложено решение задачи выбора оптимальных параметров лезвийной обработки металлов с нано и субмикросталлической структурой. Описана многокритериальная целевая функция и технологические ограничения. Рассмотрена разработанная программа с использованием метода безусловной минимизации нескольких переменных.

The solution to the problem of choosing cutting optimal parameters of metal with nano- and sub microcrystalline structure is offered. The multicriteria objective function and technological limitations are described. The program designed by the method of unconstrained minimization of several variables is considered.

В последние годы наблюдается непрерывно растущий интерес к нано- (НК) и субмикросталлическим (СМК) металлам и сплавам, которые обладают уникальными физико-механическими характеристиками, что предполагает эффективное использование изделий из НК и СМК металлов для ракетной, авиационной, автомобильной промышленности и медицины.

Наряду с повышением физико-механических и эксплуатационных свойств НК- и СМК металлов кристаллическая структура, полученная в заготовках при применении методов интенсивной пластической деформации, содержит большое количество дефектов, высокую протяженность межзеренных границ, что приводит к процессам низкотемпературной рекристаллизации при повышенных температурах [1].

Так образом, исследования по определению оптимальных режимов резания, обеспечивающих сохранение исходного размера зерна при изготовлении изделий из заготовок с объемной НК и СМК структурой, являются актуальной задачей в области технологии механообработки.

Вопросу определения оптимальных режимов резания уделено большое внимание в литературе и к настоящему моменту задача оптимизации режимов резания изучена достаточно полно, что позволяет разрабатывать не только новые математические модели для расчета режимов резания, но и реализовать их в виде разнообразных управляющих компьютерных программ. Такие

программы выполняются как в виде отдельных приложений, так и в виде модулей различных САМ и TDM систем.

Одним из общепринятых критериев оптимальности для режимов резания часто выступает производительность обработки Q – объем металла (припуска) снимаемого с заготовки в единицу времени. Варьируемыми параметрами при этом выступает скорость резания (v) и подача (s).

$$Q = v \cdot s \rightarrow \max \quad \text{или} \quad Q^{-1} = \frac{1}{vs} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где v – скорость резания; s – подача.

Главным отличием и особенностью обработки наноструктур является появление еще одного, не менее важного критерия оптимизации, управляющего процессом обработки, – размер зерна. Нано- и субмикроразмерные металлы и сплавы, за счет мелкого размера зерна и специфической структуры границ зерна, обладают уникальными свойствами. Причем размер зерна должен стремиться к минимуму, так как чем меньше размер зерна, тем выше физико-механические свойства наноматериала. Например, при точении требуется обеспечить [1]:

$$D = \sqrt{D_0^2 + A \frac{\pi d L}{vs}} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где L – длина обрабатываемой поверхности; d – диаметр обрабатываемой заготовки; D_0 – исходный размер зерна в субмикро- или нанокристаллическом металле; D – допустимый критический размер зерна, при котором сохраняются высокие физико-механические свойства металла; A – параметр, характеризующий интенсивность роста зерна, учитывающая свойства обрабатываемого материала.

Выражения (1) и (2) являются критериями оптимизации для рассматриваемой задачи.

Технические ограничения процесса лезвийной обработки представляют в виде системы неравенств (табл. 1).

Таблица 1 – Технические ограничения

| Ограничения | Зависимости |
|------------------------|---|
| Кинематические | $\begin{cases} s - s_{\min} \geq 0 \\ s_{\max} - s \geq 0 \end{cases} \quad \begin{cases} v - v_{\min} \geq 0 \\ v_{\max} - v \geq 0 \end{cases}$ |
| По шероховатости | $Ra_{\max} - C_{Ra} \cdot v^{xRa} \cdot s^{yRa} \geq 0$ |
| По микротвердости | $C_{Hv} \cdot v^{xHv} \cdot s^{yHv} - Hv_{\min} \geq 0$ |
| По мощности станка | $N_{\max} - \frac{P_z v}{60 \cdot 1000} \geq 0$ |
| По температуре резания | $T_{\max} - C_t \cdot t^{x_t} \cdot s^{y_t} \cdot v^{z_t} \geq 0$ |

В зависимости от поставленных целей оптимизация может быть одноцелевой, определяется экстремум одной целевой функции, и многокритериальной (многоцелевой) при поиске экстремума для комбинации нескольких критериев оптимизации.

Рассматриваемая задача представляет собой многокритериальную задачу оптимизации. Для ее решения был выбран метод линейной свертки. С помощью этого метода были объединены частные критерии, производительность $Q^{-1}(v,s)$ и размер зерна $D(v,s)$, в один:

$$J(Q^{-1}, D) = k_1 \cdot Q^{-1} + k_2 \cdot D, \quad (3)$$

где, Q^{-1} – частный критерий производительности; D – частный критерий размера зерна; k_1 – весовой коэффициент критерия размера зерна; k_2 – весовой коэффициент критерия производительности.

Данный метод позволяет свести задачу многокритериальной оптимизации к задаче однокритериальной оптимизации, решение которой зависит от выбранных весовых коэффициентов частных критериев.

Для решения задачи оптимизации был выбран метод штрафных функций. С помощью штрафной функции исходная задача условной минимизации преобразуется в последовательность задач безусловной минимизации. Идея преобразования задачи с ограничениями надлежащим образом представляется заманчивой главным образом в связи с наличием эффективных и надежных методов безусловной минимизации. Для применения этого метода была сформулирована следующая целевая функция:

$$F = k_1 \cdot Q^{-1} + k_2 \cdot D + R \cdot \sum_{i=1}^8 q_i^2, \quad (4)$$

где R – штрафной параметр; q_i – i -тое техническое ограничение.

При практическом расчете использовался штраф типа квадрата срезки:

$$\Omega = R \cdot \sum_{i=1}^8 \langle q(x) \rangle^2, \quad (5)$$

$$\langle q(x) \rangle = \begin{cases} q(x), & \text{если } q(x) \leq 0 \\ 0, & \text{если } q(x) \geq 0 \end{cases}$$

Если $q(x) \geq 0$, то вектор варьируемых переменных x принадлежит допустимому множеству, а в противном случае не принадлежит. В этом случае целевая функция «наказывается» штрафом, т.е. уменьшается, таким образом, пока точка x не войдет в допустимое множество, и целевая функция не начнет вновь увеличиваться.

Штраф типа квадрата срезки весьма удобен, в частности, тем, что функция определена и непрерывна по всей области значений. Вычисления проводятся с некоторым заданным положительным R ; после решения очередной подзадачи штраф R увеличивается и осуществляется поиск следующего более точного решения до достижения заданной точности.

Как уже упоминалось выше, непременным условием для корректного решения задачи оптимизации является адекватно подобранная система ограничений.

Материалом для исследований выбран технически чистый титан BT1-00 с субмикроструктурной структурой, полученной методом всестороннейковки. Изучение изменения качества поверхностного слоя (микротвердость и шероховатость) проводилось в процессе точения при варьировании условий обработки: скорость резания от 30 до 100м/мин, подача от 0,1 до 1,2мм/об. В качестве инструментального материала использовали BK8.

С использованием экспериментальных данных, приведенных в работах [2-4], полученные аналитических зависимости были приведены к каноническому виду для задания основных ограничений модели (см. табл.1). Окончательный вид для ограничений, полученный на основе экспериментальных данных приведен в табл. 2.

Для корректного применения вводимых ограничений необходимо чтобы соответствующий ограничиваемый параметр (Ra , Hv , T_{max}) не превышал максимальных или минимальных значений для сохранения высоких физико-механических и эксплуатационных свойств соответствующего материала заготовки.

Таблица 2 – Ограничения, полученные путем обработки экспериментальных данных

| Критерий ограничения | Материал заготовки | Зависимость |
|------------------------|--------------------|--|
| по шероховатости | титан BT1-00 | $Ra_{max} - 3,7 \cdot v^{0,25} \cdot s^{0,75} \geq 0$ |
| по микротвердости | титан BT1-00 | $2500 \cdot v^{-0,04} \cdot s^{-0,085} - Hv_{min} \geq 0$ |
| по температуре резания | титан BT1-00 | $T_{max} - 257 \cdot t^{0,1} \cdot s^{0,2} \cdot v^{0,5} \geq 0$ |

Таким образом, мы получили главные составляющие части задачи оптимизации – это частные критерии оптимальности (производительность и размер зерна), общий критерий оптимальности и система ограничений.

Численное решение задачи осуществлялось в программной среде MATLAB с использованием метода безусловной минимизации функции нескольких переменных *fminsearch*.

В качестве исходных данных для расчета были приняты такие значения (табл. 3):

Таблица 3 – Исходные данные для поиска оптимальных условий обработки титана

| № п/п | Обозначение | Наименование | Значения параметров |
|-------|-------------|---|------------------------|
| 1 | L | Длина обрабатываемой поверхности, м | 0,1 |
| 2 | d | Диаметр обрабатываемой заготовки, м | 0,01 |
| 3 | A | Показатель, который учитывает свойства обрабатываемого материала, м/мин | $10,12 \cdot 10^{-14}$ |
| 4 | D_0 | Исходный размер зерна, нм | 100 |
| 5 | v_{\min} | Минимальная скорость, м/мин | 30 |
| 6 | v_{\max} | Максимальная скорость, м/мин | 100 |
| 7 | s_{\min} | Минимальная подача, мм/об | 0,1 |
| 8 | s_{\max} | Максимальная подача, мм/об | 0,14 |
| 9 | t | Глубина резания, мм | 0,5 |
| 10 | N_{\max} | Мощность резания, кВт | 12 |
| 11 | Ra_{\max} | Допустимое максимальное значение шероховатости, мкм | 4 |
| 12 | Hv_{\min} | Допустимое минимальное значение микротвердости, МПа | 2600 |
| 13 | D_{\max} | Допустимый максимальный диаметр зерна, мкм | 1 |
| 14 | T_{\max} | Допустимая максимальная температура резания, К | 873 |

Общий вид целевой функции для реализации в MATLAB следующий:

$$f(v, s) = k_1 \cdot v \cdot s + k_2 \cdot \sqrt{D_0^2 + A \frac{\pi d L}{v \cdot s}} + Pen \quad (6)$$

$$Pen = R \cdot ((s_{\max} - s)^2 + (s - s_{\min})^2) + (v_{\max} - v)^2 + (v - v_{\min})^2 +$$

$$+ (3,7 \cdot v^{0,25} \cdot s^{0,75} - Ra_{\max})^2 + (2500 \cdot v^{-0,04} \cdot s^{-0,085} - Hv_{\min})^2 +$$

$$+ \left(\frac{Pz \cdot v}{60 \cdot 1000} - N_{\max} \right)^2 + (257 \cdot t^{0,4} \cdot s^{0,2} \cdot v^{0,5} - T_{\max})^2$$

где Pen – штрафующее слагаемое.

При решении многокритериальной задачи возникает проблема нормировки и масштабирования – приведения критериев к единому масштабу и безразмерному виду.

Наиболее часто используется замена абсолютных значений критериев их безразмерными относительными величинами:

$$\tilde{f}_k(x) = \frac{f_k(x)}{f_k^*}, f_k^* = \max_{x \in D} f_k(x) \quad (7)$$

Таким образом, после нормировки, исходная функция будет иметь следующий вид:

$$f(v, s) = k_1 \cdot \frac{v_{\max} \cdot s_{\max}}{v \cdot s} + k_2 \cdot \sqrt{\frac{D_0^2 + A \frac{\pi d L}{v \cdot s}}{D_{\max}}} + Pen \quad (8)$$

$$Pen = R \cdot \left(\left(1 - \frac{s}{s_{\max}} \right)^2 + \left(\frac{s}{s_{\max}} - \frac{s_{\min}}{s_{\max}} \right)^2 + \left(1 - \frac{v}{v_{\max}} \right)^2 + \left(\frac{v}{v_{\max}} - \frac{v_{\min}}{v_{\max}} \right)^2 + \right.$$

$$+ \left(\frac{3,7 \cdot v^{0,25} \cdot s^{0,75}}{Ra_{\max}} - 1 \right)^2 + \left(\frac{2500 \cdot v^{-0,04} \cdot s^{-0,085}}{Hv_{\min}} - 1 \right)^2 +$$

$$\left. + \left(\frac{Pz \cdot v}{60 \cdot 1000 \cdot N_{\max}} - 1 \right)^2 + \left(\frac{257 \cdot t^{0,4} \cdot s^{0,2} \cdot v^{0,5}}{T_{\max}} - 1 \right)^2 \right)$$

В таблице 4 и 5 приведены результаты вычислений оптимальных параметров процесса резания для субмикрористаллического титана с различным размером зерна структуры.

В качестве начальной точки для процесса оптимизации были выбраны: $v=65$ м/мин; $s=1,2$ мм/об. В качестве начального значения штрафа взято $R=10$. Значения весовых коэффициентов для выведенных результатов $k_1 = 0,7$ (для величины размера зерна структуры) и $k_2 = 0,3$ (для производительности).

Таблица 4 – Изменение оптимального решения вблизи оптимума для обработки титана с исходным размером зерна 100 нм

| Номер расчета № | Штрафная функция R | Скорость резания v , м/мин | Подача s , м/об | Производительность Q , м ² /мин | Размер зерна D , нм | Минимум функции $\min f(v,s)$ |
|-----------------|----------------------|------------------------------|-------------------|--|-----------------------|-------------------------------|
| 1 | 10 | 27.9764 | 0.0001 | 0.0028 | 310 | 0.2566 |
| 2 | 10^2 | 29.8023 | 0.0001 | 0.0030 | 330 | 0.2608 |
| 3 | 10^3 | 29.9803 | 0.0001 | 0.0030 | 330 | 0.2612 |
| 4 | 10^4 | 29.9981 | 0.0001 | 0.0030 | 330 | 0.2612 |

Таблица 5 – Изменение оптимального решения вблизи оптимума для обработки титана с исходным размером зерна 250 нм

| Номер расчета № | Штрафная функция R | Скорость резания v , м/мин | Подача s , м/об | Производительность Q , м ² /мин | Размер зерна D , нм | Минимум функции $\min f(v,s)$ |
|-----------------|----------------------|------------------------------|-------------------|--|-----------------------|-------------------------------|
| 1 | 10 | 100.1550 | 0.0001 | 0.0140 | 290 | 0.2335 |
| 2 | 10^2 | 100.0155 | 0.0001 | 0.0140 | 290 | 0.2335 |
| 3 | 10^3 | 100.0016 | 0.0001 | 0.0140 | 290 | 0.2335 |

Разработанная программа в качестве результатов выводит оптимальное решение для выбранных целевых функций при удовлетворении ограничений. Увеличение штрафа позволяет получить результаты с возрастающей точностью. Когда значение варьируемых переменных (скорость резания и подача) на двух последующих значениях штрафа совпадают до первого знака после запятой, то оптимальное решение считается полученным.

При решении оптимизационной задачи для нано- и субмикрорекристаллического титана максимальный необходимый штраф составил 10^4 и были найдены оптимальные параметры обработки. Если заготовка имеет структуру с исходным размером зерна $D=100\text{нм}$, то оптимальные параметры обработки составляют $v=30$ м/мин, $s=0,1$ мм/об при этом изменение размера зерна не превышает 330нм. При исходном размере зерна $D=250\text{нм}$ оптимальное решение имеет вид: $v=100$ м/мин, $s=0,1$ мм/об с размером зерна после обработки не более 300нм.

Полученные значения скорости резания и подачи соответствуют рациональным параметрам обработки, экспериментально полученным в работе [5].

Разработанная программа позволяет варьировать значимость частных целевых функций (коэффициентами k_1 и k_2), то есть, возможно заранее установить степень необходимости сохранения определенного размера зерна заготовки или уровня производительности для каждого изделия индивидуально.

На рис. 1 и 2 представлены графики зависимости общей целевой функции от значений весовых коэффициентов для нано- и субмикрорекристаллического титана с исходным размером зерна 100нм и 250нм соответственно.

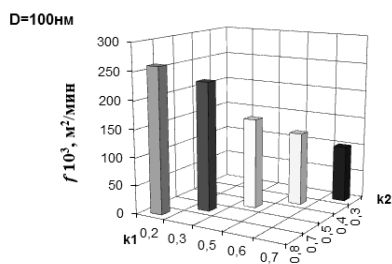


Рисунок 1 – Зависимость целевой функции от значений весовых коэффициентов для титана с исходным размером зерна 100нм

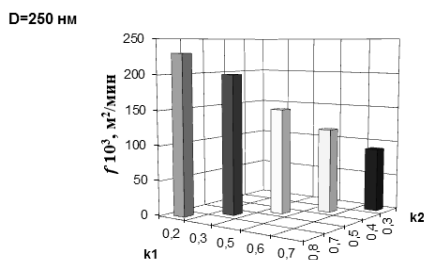


Рисунок 2 – Зависимость целевой функции от значений весовых коэффициентов для титана с исходным размером зерна 250нм

Как видно из рис. 1 и 2 при увеличении весового коэффициента при функции, определяющей величину производительности, значительно возрастает значение общей целевой функции. Однако, так как введены жесткие ограничения по размеру зерна, то наблюдается монотонное снижение произво-

дительности при увеличении весового коэффициента для функции, определяющей величину размера зерна металла после механической обработки.

Выводы:

1. В работе поставлена задача оптимизации процесса лезвийной обработки изделий из нано- и субмикрористаллических металлов.
2. В качестве критериев оптимальности предложен общий критерий, объединяющий на основе линейной свертки два частных критерия – производительность и величину размера зерна нано- и субмикрористаллических металлов, каждому из которых соответствуют собственные весовые коэффициенты.
3. Обоснованы и получены на основе титана ВТ1-00 технические и технологические ограничения для задачи оптимизации процесса обработки нано- или субмикрористаллических металлов.
4. Решение задачи оптимизации осуществлялось методом штрафной функции в программной среде MATLAB с использованием метода безусловной минимизации нескольких переменных *fmin-search*.
5. Получены практические оптимальные решения по выбору скорости резания и подачи при точении нано- и субмикрористаллического титана с разным исходным размером зерна.

Список использованных источников: 1. *Каптай Дж.* Прогнозирование поведения субмикро- и нанокристаллических металлов при механической обработке / *Дж. Каптай, А.А. Симонова, Н.В. Вerezуб* // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХП», 2011. – вип. 6. – С. 40-51. 2. *Симонова А.А.* Особенности механической обработки титана с субмикрористаллической структурой / *А.А. Симонова, А.Я. Мовиович, Л.И. Пувань и др.* // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського, 2009. – вип. 6 (59), ч. 1 – С. 70-75. 3. *Симонова А.А.* Влияние механической обработки на микротвердость заготовок из титана с субмикрористаллической структурой, полученных интенсивной пластической деформацией / *А.А. Симонова, Н.В. Вerezуб, Л.И. Пувань* // Високи технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХП», 2011. – вип. 1 (21). – С. 214-220. 4. *Грабченко А.И.* Резание металлов с объемной нано- и субмикрористаллической структурой: монография / *А.И. Грабченко, Дж. Каптай, А.А. Симонова и др.* – Х.: «Точка», 2012. – 217с. 5. *Каптай Дж.* Определение области рациональных условий лезвийной обработки субмикрористаллических металлов / *Дж. Каптай, А.А. Симонова, Н.В. Вerezуб* // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: зб. наук. праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХП», 2010. – №53. – С. 114-121.

Поступила в редколлегию 15.04.2012