А. В. Бобровский, О. И. Драчев, И. Ю. Амирджанова

**ТЕХНОЛОГИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ
ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ УПРАВЛЕНИИ ПРОЦЕССА
С УЧЕТОМ ВНЕШНИХ СЛУЧАЙНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

Тольяттинский государственный университет

E-mail: doi05@mail.ru

В статье дано краткое описание процесса изготовления маложестких длинномерных осесимметричных деталей типа «вал» двух основополагающих операций – холодной правки и механической обработки. Доказано, что при механическом воздействии на заготовку действуют случайные взаимодействия за счет неоднородностей текстуры. Эти воздействия приводят к возбуждению колебаний всех частей, но передача энергии осуществляется на частоте, близкой к резонансной. Неоднородности напряжений можно учесть как случайные, дельта-коррелированные изменения частоты системы. Анализируется механизм поглощения энергии кристаллитами (зернами), за счет которого и происходит перераспределение напряжений.

Ключевые слова: маложесткая деталь; автоматическое управление; процессы правки и механической обработки; внешние случайные воздействия; напряжения.

A. V. Bobrovskiy, O. I. Drachev, I. Yu. Amirdzhanova

THE TECHNOLOGY OF PROCESSING AXISYMMETRIC PARTS WITH AUTOMATIC CONTROL OF THE MACHINING PROCESS, TAKING INTO ACCOUNT EXTERNAL RANDOM INFLUENCES

Togliatti State University

The article gives a brief description of the manufacturing process of non-rigid parts of two fundamental operations - dressing and machining. It is proved that during mechanical action on the workpiece random interactions due to texture inhomogeneities act. These effects lead to the excitation of oscillations of all parts, but energy is transferred at a frequency close to the resonant. Stress inhomogeneities can be taken into account as random, delta – correlated changes in the system frequency. The mechanism of energy absorption by crystallites (grains) is analyzed, due to which stress redistribution occurs.

Keywords: non-rigid part; automatic control; dressing and machining processes; external random influences; voltage.

Известные технологические приемы обработки маложестких деталей, даже изготовленных с заданной геометрической точностью, не обеспечивают заданных параметров. Готовые изделия теряют свою точность в процессе эксплуатации за счет проявления технологической наследственности – перераспределения напряжений в заготовке, начиная со стадии ее формирования (прокатки, механической обработки, правки и пр.).

Одним из путей устранения влияния остаточных напряжений на геометрическую форму детали является выравнивание поверхностных напряжений до и после механической обработки за счет управляемого процесса поверхностно-пластическим деформированием. Для этого перед механической обработкой заготовку автоматически правят путем установки ее в самоцентрирующие парные кольцевые люнеты [1], придают ей вращение и прикладывают заданные усилия правки в каждой паре кольцевых люнетов, соответственно равные величине и противоположные по направлению.

Силу воздействия для автоматического самоцентрирования заготовки в кольцевых люнетах задают исходя из геометрических параметров последней, величины максимального первоначального прогиба и физико-механических свойств ее материала. Скорость автоматического самоцентрирования определяют и задают на основании динамической устойчивости упругой системы станка и приспособления, а продолжительность цикла правки на данном этапе определяют автоматически, исходя из равенства реакций от переменных составляющих сил в средней и крайних парах кольцевых люнетов. Усилия правки в люнетах увеличивают до полного равенства переменных составляющих реакций, меняющихся с частотой вращения заготовки. При достижении минимальной разности ам-

плитуд реакций в люнетах, заготовку перемещают возвратно-поступательно вдоль ее оси [2].

При механической обработке [3], от прохода к проходу, управляют угловым положением инструмента поворотом относительно оси Z , проходящей через его вершину, что позволяет управлять площадью сечения снимаемого слоя материала в течение одного оборота заготовки, в функции изменения припуска. Варьируя площадью срезаемого слоя в течение одного оборота заготовки, можно добиться равномерного распределения остаточных напряжений на поверхности обрабатываемой детали, а следовательно, сохранить полученную точность формы детали в процессе обработки в течение заданного срока ее эксплуатации.

Для простоты анализа рассмотрим закрепленные в самоцентрирующие кольцевые люнеты заготовку как одномассовую систему. Неоднородности структуры и напряжений учтем введением случайных параметров. Динамическая система в этом случае описывается системой уравнений

$$\frac{dx}{dt} = y$$

$$\frac{dy}{dt} = -2\gamma y - \omega_0^2 [1 + z(t)] + f_0 \cos \Omega t + f(t), \quad (1)$$

где γ – коэффициент затухания; ω_0 – собственная частота однородной системы; $z(t)$ – случайная функция времени, которая описывает изменение частоты за счет флуктуаций модуля упругости и др.; $f_0 \cos \Omega t$ – приведенная сила за счет вращения заготовки; $f(t)$ – случайная приведенная сила, возникающая за счет неоднородностей напряжений.

Вначале рассмотрим воздействие случайной силы на гармонические колебания ($z(t) = 0$, $f_0 = 0$), так как в этом случае уравнение (1) решается аналитически. Тогда передаточная функция системы

$$\omega(p) = \frac{1}{p^2 + 2\gamma p + \omega_0^2}$$

Внешнее силовое воздействие в кольцевых люнетах будем считать «белым шумом», а установившееся движение системы будет представлять собой стационарный процесс со спектральной плотностью

$$F(\omega) = \sigma_f^2 / 2\pi \times |\varphi(\omega)|^2$$

Спектральная плотность характеризует распределение энергии

$$\left[\xi(t) = \int_0^\infty e^{i\omega t} d\phi(\omega) \right]$$

случайного процесса $[\xi(t) = \int_0^\infty e^{i\omega t} d\phi]$ по составляющим его элементарным колебаниям в зависимости от частоты ω .

В нашем случае спектральная плотность

$$F(\omega) = \left(\frac{\sigma_f^2}{2\pi}\right) [(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4\gamma\omega^2]^{-1} \quad (2)$$

Она имеет максимум при $\omega^2 = \omega_0^2 - \gamma^2$. Это говорит о том, что в случайном процессе резко преобладают «элементарные» колебания

$$\langle x^2(t) \rangle = \frac{1}{2} \omega_0^2 \left\{ (\sigma^2 \omega_0^2 - 2\gamma) t \left[1 - \exp\left(c - \frac{3}{2} \sigma^2 \omega_0^2 t\right) \cos 2\omega_0 t \right] \right\} \quad (3)$$

Из выражения (3) видно, что параметрическое возбуждение системы имеет место, если

$$\sigma^2 \omega_0^2 > 2\gamma \quad (4)$$

Если внешнее воздействие $f(t)$ – тоже гаус-

с частотами, близкими к собственной частоте ω_0 рассматриваемой системы.

Средняя амплитуда случайных колебаний, заданных случайным процессом, $\langle A \rangle = \int_0^\infty F(\omega) d\omega$. Таким образом, если $\gamma^2 \ll \omega^2$, то случайные влияния воздействия играют преимущественную роль по сравнению с периодической силой (считаем, что $\Omega \neq \omega_0$).

Учтем теперь случайные изменения частоты в выражении (1). Тогда решение его – простейшая задача, не допускающая решения в явном виде. Выражение для совместной плотности вероятностей величин x и y имеет вид операторного уравнения. Для дельта-коррелированных флуктуаций

$$\langle z(t)z(t') \rangle = 2\sigma^2 \delta(t - t').$$

Как следует из работы [2], выражение для плотности принимает вид уравнения Эйнштейна – Фоннера. При отсутствии внешних воздействий среднее значение квадрата смещения имеет вид

совский коррелированный процесс $\langle f(t)f(t') \rangle = 2\sigma^2 f \delta(t - t')$, то уравнение для вторых моментов в этом случае выглядит как система уравнений

$$\begin{aligned} \left(\frac{d}{dt}\right) \langle x^2 \rangle &= 2 \langle xy \rangle, \quad \left(\frac{d}{dt}\right) \langle xy \rangle = \langle y^2 \rangle - 2\gamma \langle xy \rangle - \omega_0^2 \langle x^2 \rangle; \\ \left(\frac{d}{dt}\right) \langle y^2 \rangle &= -\varphi \gamma \langle y^2 \rangle - 2\omega_0 \langle xy \rangle + 2\sigma^2 \omega_0^2 \langle x^2 \rangle + 2\sigma^2 f^2 \end{aligned}$$

Стационарное решение этой системы существует при выполнении условия (4)

$$\begin{aligned} \langle xy \rangle &= 0 \langle x^2 \rangle = \sigma_f^2 / [\omega_0^2 (\sigma_0^2 - 2\gamma^2)], \\ \langle y^2 \rangle &= \omega_0^2 \langle x^2 \rangle. \end{aligned}$$

Среднее значение первых моментов ($\langle x \rangle = \langle y \rangle = 0$) такое же, как и при любых колебаниях.

Как следует из выше изложенного, влияние внешних воздействий сводится к установлению стационарных средних значений, т. е. величины поглощаемой энергии. Условия же возбуждения определяются внутренними параметрами системы уравнения. Энергия, поглощаемая системой, расходуется на выравнивание неоднородностей, поэтому σ^2 (дисперсия) медленно уменьшается со временем

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 \exp[-(t/\tau)],$$

где τ – постоянная времени, характерная для конкретной системы.

Следовательно, если выполнено условие $\sigma_0^2 \omega_0^2 > 2\gamma, t = 0$, то с течением времени колебания увеличиваются. Амплитуда колебаний достигает максимума в момент времени $t = \tau [\ln(\sigma^2 \omega_0^2 / 2\gamma)]^{-1}$. То обстоятельство, что $\langle x^2 \rangle \rightarrow \infty$ означает почти мгновенное исчезновение неоднородностей, параметрическое возбуждение системы невозможно.

Время релаксации t зависит от частоты вращения: $\Omega: \tau = \tau_0 \Omega^{-1}$.

Чтобы оценить τ_0 , нужно рассмотреть процесс поглощения энергии в твердом теле. Энергию, которая расходуется на перераспределение напряжений в поликристаллическом теле, можно определить через коэффициент поглощения упругих волн [5].

Если длина волны $\lambda \gg a$, где a – размеры отдельных кристаллитов (в нашем случае поглощение велико вблизи $\omega = \omega_0$).

Так как $a \approx 10^{-3} \text{ м}$, $v = 10^3 \text{ м/с}$, $\omega_0 \approx 10^2 \div 10^3$, то $\lambda = v/\gamma \approx 0.1 \text{ м}$, $\lambda \gg a$, то можно считать, что каждый кристаллит подвергается воздействию равномерно распределенного давления. Ввиду анизотропии кристаллитов и граничных условий на поверхностях их соприкосновения возникающая при этом деформация неоднородна. Она будет испытывать существенные изменения (порядка величины ее самой) на протяжении размеров кристаллита, а не на протяжении длины волны [5].

Этот механизм поглощения и приводит к перераспределению напряжений. Поглощение колебаний обусловлено прежде всего теплопроводностью, а не вязкостью, так как градиенты температуры в пределах кристаллита аномально велики.

Если $\omega^2 \ll \chi/a^2$, где χ – теплопроводность материала, то коэффициент поглощения

$$F(\omega) \approx (T\alpha^2 \rho v_0^2 / \chi c) \omega^2,$$

где α – коэффициент температурного расширения; ρ – плотность; v – скорость звука; c – теплоемкость.

Коэффициент поглощения находится интегрированием

$$\Gamma = \int_0^\infty \Gamma(\omega) F(\omega) d\omega / \int_0^\infty F(\omega) d\omega,$$

где $F(\omega)$ – спектральная плотность (определена по формуле (2)). Для численной оценки, очевидно, что $\tau_0^{-1} \sim F$.

В данной статье показано, что при механическом воздействии на заготовку действуют случайные взаимодействия за счет неоднородностей текстуры. Эти воздействия приводят к возбуждению колебаний всех частей, но передача энергии осуществляется в основном на частоте, близкой к резонансной. Неоднородно-

сти напряжений можно учесть как случайные, дельта коррелированные изменения частоты системы. При достаточно больших флуктуациях возникают параметрические стохастические колебания, которые ведут к уменьшению неоднородностей. Время релаксации t_p , т. е. время, за которое исчезают флуктуации напряжений, определяется соотношением между дисперсией флуктуаций, собственной частотой и коэффициентом затухания; оно обратно пропорционально частоте вращения

$$t_p = \tau_0 [\Omega \ln(\sigma_2 \omega_0^2 / 2\gamma)]^{-1}$$

Анализируется также механизм поглощения энергии кристаллитами (зернами), за счет которого и происходит перераспределение напряжений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Драчев, О. И. Технология изготовления маложестких осесимметричных деталей : монография / О. И. Драчев ; Тол. политех. инст. – Тольятти : Изд-во Москва, 2012. – 285 с.
2. А. с. 1653260 СССР. МКИ В23Q15/00. Способ автоматического управления процессом правки осесимметричных деталей и устройство для его реализации / О. И. Драчев ; заявитель и патентодержатель Тольяттинский политехнический институт. – №4698346; заявл. 31.05.89; опубл. 01.02.1991 Бюл. №8. – 20 с.
3. Пат. 2256543 Российская Федерация, МПК В23Q15/12. Устройство для автоматического регулирования скорости подачи инструмента при механической обработке / О. И. Драчев ; заявитель и патентодержатель Тольяттинский государственный университет. – №2003121549/02; заявл. 11.07.03; опубл. 27.02.05. Бюл. №20. – 7 с.
4. Кляцкин, В. И. Стохастические уравнения и волны в случайно-неоднородных средах / В. И. Кляцкин. – М. : Наука, 1980. – 327 с.
5. Ландау, Л. Д. Теория упругости / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1965. – 323 с.