

- дование вибраций при резании металлов ( построение математической модели процесса). Межвуз. сб.: Исследование обрабатываемости жаропрочных и титановых сплавов, вып. I, Куйбышев, 1973.
4. Бурмистров Е.В., Маркушин Е.М., Тарасов А.В. Крутильные колебания и их влияние на стойкость сверл малых диаметров при обработке жаропрочных и титановых сплавов. Материалы симпозиума "Прогрессивные конструкции сверл и их рациональная эксплуатация". Вильнюс, 1974.
  5. Бурмистров Е.В., Маркушин Е.М., Тарасов А.В. Исследование вибраций, сопровождающих процесс сверления отверстий малых диаметров (разработка математической модели автоколебательного процесса при сверлении). - Межвуз. сб.: Исследование обрабатываемости жаропрочных и титановых сплавов, вып. 2. Куйбышев, 1974.
  6. Бурмистров Е.В., Тарасов А.В. Исследование крутильных колебаний сверл при обработке титановых сплавов. Материалы научно-технической конференции. Куйбышев, 1970.

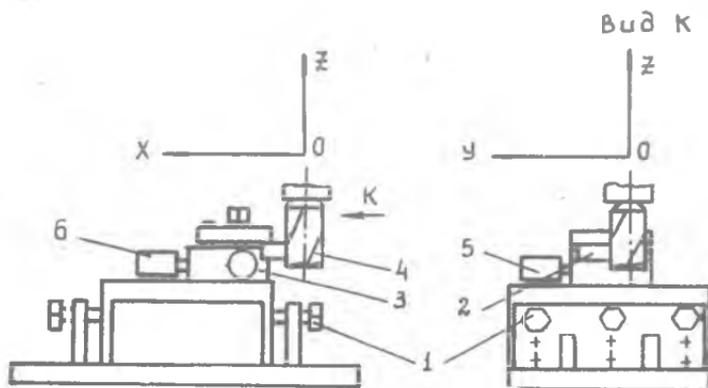
Э.А. Михайлюк, Я.И. Солер, В.С. Коляка

#### ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИЙ НА ОБРАБАТЫВАЕМОСТЬ ВЫСОКОПРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ КОНЦЕВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ

В данной работе рассматривается влияние вибраций на стойкость инструмента и качество поверхности при обработке высокопрочной нержавеющей стали X15H5Д2Т ( $\sigma_B = 135 \text{ кгс/мм}^2$ ,  $\sigma = 12\%$ ) и титанового сплава BT20 ( $\sigma_B = 95-110 \text{ кгс/мм}^2$ ,  $\sigma = 8\%$ ). Оценка качества поверхности производилась по шероховатости ( $R_a$ ), высоте ( $H_B$ ), шагу ( $L_B$ ) волнистости, степени наклепа ( $\Delta H_V$ ), неравномерности упрочнения поверхности, характеризуемой отношением микротвердостей, замеренных во впадине и на вершине микронеровностей ( $H_{V_{дн}}/H_{V_{выс.}}$ ).

Интенсивность вибраций в процессе обработки изменялась путем варьирования жесткости системы "деталь-приспособление" и режимов резания. Для этого было изготовлено приспособление (рис. I), жесткость которого могла изменяться за счет уменьшения толщины боковых стенок крепежного столика и их поджима болтами I на разной высоте. При изучении качества поверхности образцы 2 закреплялись в державке 3, а при стойкостных испытаниях - непосредственно на столике при-

способления. Колебания детали при фрезеровании концевой фрезой 4 регистрировались сейсмическими датчиками 5 и 6 (типа МВ-22Г) в



Р и с.1. Схема экспериментальной установки

двух направлениях: совпадающем (по оси Y) и ортогональном (по оси X) вектору подачи. Полученные вибросигналы через переходной блок поступали на усилитель и записывались с помощью осциллографа Н102. Тарировка датчиков вибраций осуществлялась в динамическом режиме на вибростенде.

Фрезерование производилось на станке 6Н13П, по подаче на следующих режимах: скорость резания  $v = 9,4-47$  м/мин; подача  $S_z = 0,03 - 0,33$  мм/зуб; глубина  $t = 20$  мм; ширина  $B=3-12$  мм; СОЖ - 7% эмульсия СДМУ-2. Жесткость системы " деталь-приспособление"  $f_{\partial x}^X$  изменялась от 1200 до 30770 кгс/мм.

При изучении качества поверхности использовались концевые фрезы из стали Р18 стандартной конструкции с усиленной сердцевиной ( $D=50$  мм,  $z = 4$ ,  $\omega = 40^\circ$ ), при стойкостных испытаниях - фрезы [1] ( $D=40-50$  мм,  $z = 1$ ) со вставными ножами из стали Р18. Геометрия заточки:  $\alpha_r = 12^\circ$ ,  $\gamma_n = 6^\circ$  - при обработке стали Х15Н5Д2Г и  $\alpha_r = 6-10^\circ$ ,  $\gamma_n = -6^\circ$  - при обработке сплава ВТ20. За критерий притупления принимался износ по задней грани, равный  $h_z = 0,4$  мм.

X В дальнейшем для краткости жесткость системы " деталь-приспособление" будем называть жесткостью детали.

Результаты опытов показывают, что вибрации детали при фрезеровании вызваны врезанием зуба в обрабатываемый материал, поэтому с увеличением скорости резания частота колебаний возрастает. Затупление инструмента, особенно при обработке титанового сплава, ведет к увеличению интенсивности колебаний детали. При недостаточной жесткости системы  $f_{\partial x}$  затупление инструмента сопровождается возрастанием колебаний в 1,5-2 раза.

Минимально допустимая жесткость зависит от сил резания, вызывающих отжимы элементов системы СПИД, и растет с увеличением основных параметров резания  $t$ ,  $S_z$ ,  $\beta$  и др. Так, при фрезеровании титанового сплава BT20 с подачей  $S_z = 0,06$  мм/зуб величина минимально допустимой жесткости составила 1200 кгс/мм, а при  $S_z = 0,13$  мм/зуб - 4600 кгс/мм.

Результаты исследования показали, что наибольшие вибрации возникают в направлении наименьшей жесткости детали - по оси X, при этом их величина может превышать интенсивность колебаний по оси Y в 6 раз. Эти колебания оказывают решающее воздействие на стойкость режущего инструмента. Так, при обработке сплава BT20 снижение амплитуды колебаний  $A_{\partial x}$  в 3-5 раз, обусловленное изменением жесткости  $f_{\partial x}$  от 1200 до 11100 кгс/мм, дало повышение стойкости фрез в 1,5-2,5 раза. При фрезеровании более пластичной стали X15H5Д2Т наблюдается меньшее увеличение стойкости инструмента.

На основании результатов стойкостных испытаний получены следующие зависимости:

$$T = C_1 A_{\partial x}^n, \quad T = C_2 f_{\partial x}^m$$

где  $A_{\partial x}$  - амплитуда колебаний детали по оси X, мм (табл.)

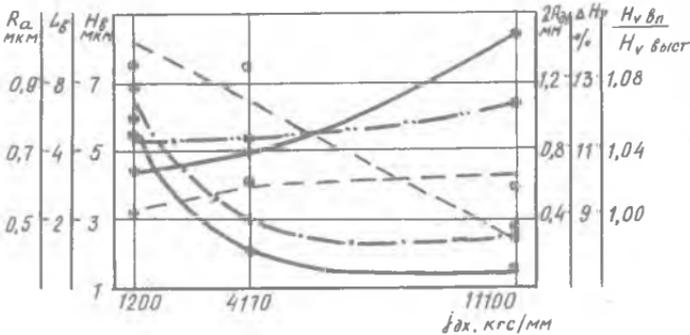
Т а б л и ц а

Значения коэффициентов  $C_1$ ,  $C_2$  и показателей степеней

Обрабатываемый материал	$S_z$ мм/зуб	$C_1$	$n$	$C_2$	$m$
BT20	0,06-0,08	5	-0,23	1,93	0,22
	0,10-0,13	2,43	-0,71	0,62	0,44
X15H5Д2Т	0,06-0,08	11,79	-0,32	5,16	0,22

Существенное влияние на качество обработанной поверхности оказывают вибрации. Как видно из рис.2, снижение интенсивности колебаний детали в 10 раз, за счет повышения ее жесткости, ведет к умень-

шению высоты микро- и макронеровностей поверхности в 1,8-2 раза.



Р и с.2. Влияние жесткости детали на амплитуду колебаний детали, шероховатость и волнистость поверхности: обрабатываемый материал - XI5H5Д2Т; режим резания -  $v = 47$  м/мин,  $B = 12$  мм,  $S_z = 0,2$  мм/зуб,  $t = 3$  мм; --  $H_g$ ; -  $\bullet$  -  $\frac{H_v \delta_n}{H_v \delta_{нст}}$ ; -  $\circ$  -  $\Delta H_v$ ; -  $\square$  -  $L_g$ ; -  $\circ$  -  $R_a$ ; -  $\bullet$  -  $2A_{\delta x}$

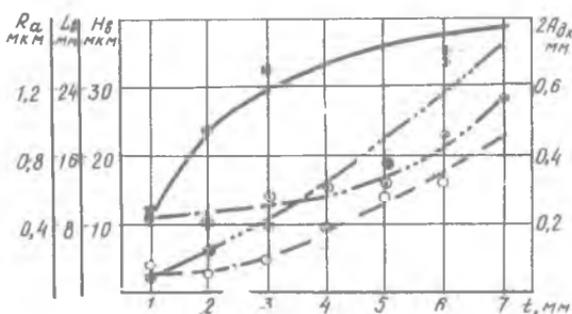
При этом незначительно возрастают шаг волнистости  $L_g$ , степень  $\Delta H_v$  и неравномерность наклепа. Это может отрицательно сказаться на эксплуатационных характеристиках изделий [2]. Поэтому повышение жесткости системы "деталь - приспособление" следует производить с учетом требуемой стойкости инструмента и качества обработанной поверхности.

Увеличение элементов режима резания, в большинстве случаев, способствует росту вибраций детали и ухудшению качества поверхности. Так, с увеличением глубины резания при фрезеровании образцов из стали XI5H5Д2Т, имеющих жесткость  $f_{ax} = 1200$  кгс/мм (рис.3), амплитуда колебаний  $A_{\delta x}$  увеличивается от 0,1 до 0,38 мм, а высота ( $H_g$ ) и шаг волнистости ( $L_g$ ) возрастают соответственно в 26 и 17 раз. Среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a$  возрастает менее интенсивно, особенно при  $t \leq 4$  мм.

С повышением жесткости детали  $f_{ax}$  до 11100 кгс/мм интенсивность колебаний снижается в 3-4 раза, что замедляет рост параметров качества поверхности  $R_a$ ,  $H_g$  и  $L_g$ .

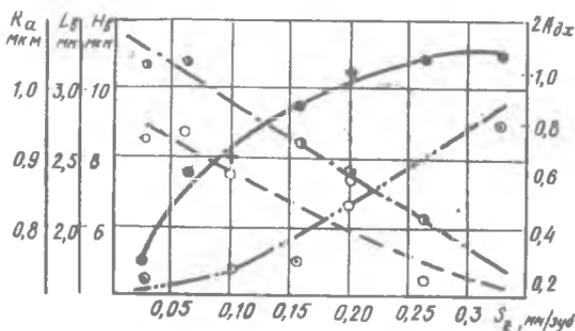
Неравномерность наклепа поверхности при различных глубинах резания составляет 3-10%. С увеличением жесткости детали отношение

$H_{\text{вн}}/H_{\text{внст}}$  уменьшается. При этом степень наклепа  $\Delta H_{\text{в}}$  изменяется в незначительных пределах.



Р и с.3. Влияние глубины резания на амплитуду колебаний и качество обработанной поверхности: обрабатываемый материал - ХТ5Н5Д2Т; режим резания -  $v = 47$  м/мин,  $B = 12$  мм,  $S_z = 0,06$  мм/зуб; жесткость системы  $j_{zx} = 1200$  кгс/мм;  $\bullet$  -  $2A_{dx}$ ;  $\circ$  -  $R_a$ ;  $\dots$  -  $L_b$ ;  $\dots$  -  $H_b$ .

Варьирование подачи  $S_z$  от 0,03 до 0,33 мм/зуб вызывает увеличение амплитуды колебаний  $A_{dx}$  в 3-5 раз и ухудшение шероховатости обработанной поверхности на 2-3 разряда (рис.4). Это вызвано



Р и с.4. Влияние подачи на амплитуду колебаний детали, шероховатость и волнистость поверхности: ХТ5Н5Д2Т;  $v = 47$  м/мин,  $B = 12$  мм,  $t = 3$  мм;  $j_{zx} = 1200$  кгс/мм;  $\bullet$  -  $2A_{dx}$ ;  $\circ$  -  $H_b$ ;  $\dots$  -  $L_b$ ;  $\dots$  -  $R_a$ .

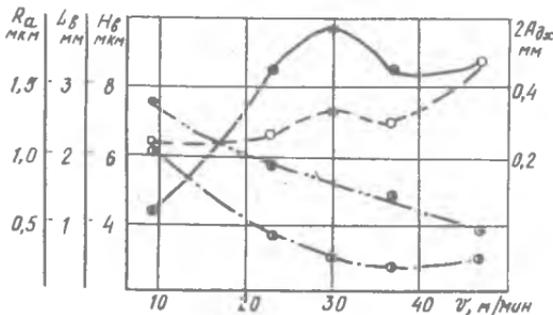
возрастанием пластического деформирования металла под воздействием сил резания и царапанием поверхности стружкой.

Закономерность изменения макропрофиля поверхности от подачи имеет более сложный характер и зависит от соотношения жесткостей детали и фрезы  $K = \frac{E \delta}{J \rho}$ . При коэффициенте  $\kappa \leq 8$  (при жесткости  $J \rho \leq 4200 \text{ кгс/мм}$ ) возрастание подачи дает уменьшение волнистости в 2-3 раза (см. рис.4); для  $K > 8$  волнистость уменьшается только при  $S_z \leq 0,02 \text{ мм/зуб}$ , когда с возрастанием толщины среза резко ухудшается макропрофиль поверхности, особенно за счет увеличения высоты  $H_B$ .

Полученные результаты объясняются прежде всего тем, что сталь X15H5Д2Т содержит в аустенитной структуре карбидные и интерметаллидные включения, имеющие иную твердость и способность к упрочнению при деформации. При обработке резанием это приводит к появлению специфической волнистости поверхности [2].

Обнаружено, что возрастание подачи в варьируемых пределах ведет к снижению микротвердости поверхности и степени наклепа. Неравномерность наклепа мало зависит от подачи и не превышает 3-12%.

Значительное влияние на интенсивность колебаний детали оказывает скорость резания. С увеличением  $v$  от 9,4 до 30 м/мин амплитуда колебаний  $A_{\sigma x}$  сначала возрастает, а затем начинает снижаться. При обработке деталей из стали X15H5Д2Т, имеющих жесткость  $J \rho = 4600 \text{ кгс/мм}$  (рис.5), максимальное значение амплитуды  $A_{\sigma x}$  составляет 0,29 мм. С увеличением жесткости детали до 30770 кгс/мм оно снижается до 0,14 мм.



Р и с.5. Влияние скорости резания на амплитуду колебаний детали, шероховатость и волнистость поверхности: X15H5Д2Т; В = 12 мм,  $t = 4$  мм;  $S_z = 0,06 \text{ мм/зуб}$ ;  $J \rho = 4600 \text{ кгс/мм}$ ; —•—  $2A_{\sigma x}$ ;  
 ○ — — —  $R_\alpha$ ; — — ○ —  $L_\delta$ ; ○ — — —  $H_\delta$

С ростом скорости резания закономерности изменения шага  $L_f$  и амплитуды колебаний детали имеют идентичный характер, но наблюдается уменьшение параметров  $R_a$  и  $H_f$  поверхности.

При жесткостях детали  $j_{ax} \leq 25000$  кгс/мм возрастание скорости резания до 36,9 м/мин сопровождается снижением микротвердости и степени наклепа поверхности, которая не превышает 10-22%. При скорости  $v = 30$  м/мин в результате интенсификации колебаний детали наблюдается усиление неравномерности наклепа поверхности.

### Л и т е р а т у р а

1. Подпоркин В.Г., Бердников Л.Н. Фрезерование труднообрабатываемых материалов. Л., "Машиностроение", 1972.
2. Даниелян А.М. и др. Обработка резанием жаропрочных сталей, сплавов и тугоплавких металлов. М., "Машиностроение", 1965.

Ю.С. Быховский, Г.Т. Авдонин, Р.Н. Мдановский, Г.Ф. Миледин

### БЕСКОНТАКТНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ВИБРАЦИИ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ С АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОДСТРОЙКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ МЕШАЮЩИХ ФАКТОРОВ

Для современной техники характерен переход к более высоким скоростям работы различных механизмов. Неуравновешенность движущихся частей механизмов вызывает вредные вибрации, приводящие к быстрому износу деталей, а в некоторых случаях и к авариям.

В настоящее время изучением вибраций занимаются во всех отраслях народного хозяйства: в судостроении - при работах над снижением уровня вибраций и шума различных механизмов; в авиационной технике - при совершенствовании самолетов и повышении мощности их двигателей; в энергетике - при создании турбин и электрических машин с высоким коэффициентом полезного действия и надежности, при исследовании динамики процессов резания и т.д.

В некоторых случаях необходимо измерять перемещения или вибрации при минимальном влиянии измерителя на объект контроля, например, при измерении собственной резонансной частоты или перемещений объектов, механический контакт с которыми нежелателен. В этих случаях используются **бесконтактные** преобразователи, у которых связь с объектом осуществляется посредством электрического (емкостного),