

## ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ПЛОСКОМ ШЛИФОВАНИИ

© 2018 П.М. Салов<sup>1</sup>, А.Ф. Денисенко<sup>2</sup>, Д.П. Салова<sup>3</sup><sup>1</sup>Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары<sup>2</sup>Самарский государственный технический университет<sup>3</sup>ОАО «Электроприбор», г. Чебоксары

Статья поступила в редакцию 25.06.2018

В статье приводятся результаты исследования процесса шлифования в условиях ограниченной жесткости ТС. Установлено, что в направлении поперечной подачи может существенно влиять на процесс, поэтому необходимо обеспечивать работу всей поверхности шлифовального круга. Кроме этого, целесообразно провести модернизацию станков, позволяющих более эффективно их использовать. С этой целью предлагается применять станки с ЧПУ, оснащенных быстродействующими жесткими приводами подач, что позволит более существенно увеличить эффективность предлагаемых мероприятий. Показано, что наибольшая эффективность процесса плоского шлифования может быть достигнута при использовании адаптивной системы управления

*Ключевые слова:* плоское шлифование, износ, режимы резания, жесткость привода, адаптивная система, припуск, правка, виброустойчивость.

## ВВЕДЕНИЕ

Плоское шлифование осуществляют периферией или торцом круга. Каждая, из этих разновидностей реализуется различными способами, которые имеют свои преимущества и недостатки.

Трудности обеспечения высокой точности и малой шероховатости поверхности деталей связаны с податливостью и виброустойчивостью технологической системы (ТС), стойкостью и износом круга, условиями правки, а также от формы круга, условиями прохождения цикла, траектории движения круга при удалении припуска. Как правило, высокая точность детали обеспечивается длительным выхаживанием [1-15].

На практике величина периодической поперечной подачи, задается долями от высоты круга. Общая величина поперечного перемещения стола обеспечивает прохождение всей высоты круга по поверхности заготовки. В ряде исследований рекомендуется, чтобы в крайних положениях половина высоты круга оставалась в контакте. Судя по рекомендациям по назначению режимов резания, часто величина поперечной подачи составляет 0,2-0,7 от высоты круга. Углубленный анализ при назначении величины поперечной подачи и общей длины хода стола отсутствует.

*Салов Петр Михайлович, доктор технических наук, профессор. E-mail: msfkafedratm@yandex.ru*

*Денисенко Александр Федорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизированные станочные и инструментальные системы». E-mail: ask@samgtu.ru*

*Салова Дина Петровна, главный технолог. E-mail: sgt@elpribor.ru*

Величина продольного хода стола больше ширины заготовки на величину перебега, которые рекомендуется в пределах 20-60 мм. Столь большие перебеги обусловлены необходимостью снижений вибраций при реверсировании [7-10].

В известных литературных источниках процесс рассматривается без учета реальной деформации в ТС, которую необходимо оценивать по величине отжатия (натяга в ТС) и угла разворота круга. При этом решающее влияние на процесс оказывает колебание величины угла разворота круга, положение образующей которого ответственно за производительность, геометрию и качество обработанной поверхности [1-6, 10].

Так как шпиндельный узел плоскошлифовального станка крепится консольно, его жесткость мала. По данным Л.Н.Филимонова [9] жесткость технологической системы главного привода (ТСГП) станка 3Е711В-1 при статической нагрузке 392 Н составляет примерно 7,84 Н/мкм.

Жесткость ТСГП относительно стола рекомендуется определять с помощью специального динамометра при нагружении силой, действующей от стола через центр оправки под углом 20° к вертикали [9]. Такое направление, согласно нашим расчетам, соответствует направлению равнодействующей R от сил  $P_y$  и  $P_z$  при их отношении равном 2,747. А. В. Якимов [11] рекомендует определять динамическую жесткость, которая по данным [7] зависит от типа подшипников шпиндельного узла.

Шпиндель станка 3Е711В-1 смонтирован на подшипниках качения: роликовый и два радиально-упорных, а станков 3Е711ВФ1, 3Е711АФ1, 3Е721АФ1, 3Б71 – гидродинамические самоустанавливающиеся скольжения.

Динамическая жесткость ТСПП станка ЗБ71 выше статической. Она составляет по данным [11] от 3 до 5,2, а удельная (в пределах некоторого диапазона) от 3 до 10 Н/мкм. По нашим данным (см. рис. 1,б) она несколько выше – от 3,3 до 10 Н/мкм. При этом фиксировалось вертикальное отжатие (подъем) подшипника №2215 с расшлифованным отверстием, устанавливаемого вместо круга, а нагрузка прикладывалась под углом 20°. Жесткость ТСПП станка ЗБ71 увеличивается с увеличением нагрузок  $P_y$  и  $R$ .

Данные свидетельствуют о том, что жесткость ТСПП плоскошлифовальных станков мала. Особенно при нагрузках, характерных для процесса выхаживания, при котором окончательно формируется поверхность. Жесткость шлифовальной бабки относительно стола станка ЗБ71М, по данным В. А. Прилуцкого [8], составляет 22,5–25,0 Н/мкм, а при больших нагрузках – от 32 до 45 Н/мкм. Эти величины относительно малы для столь габаритных и тяжелых узлов станка. Наличие угла разворота круга по данным [11] приводит к значительному наклону фронтальной поверхности прерывистого круга.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментально установлено, что в некотором рабочем диапазоне зависимости  $\Delta=f(R)$  и  $\alpha=f(\Delta)$  можно представить линейными при некоторой приведенной длине консоли  $l_{прив}$ , большей фактической  $l$ , а величины  $\Delta$  и  $\alpha$  для конца консоли можно считать как для заземленной одним концом консольной балки  $\Delta=RI_{прив}^3/3EJ$  и  $\alpha=\Delta/c$ , где  $EJ$  – жесткость балки,  $c$  – коэффициент, определяемый экспериментально [7].

Учитывая явно выраженную однородность зависимостей  $\Delta=f(R)$  и  $\alpha=f(R)$ , можно утверждать, что с увеличением ширины перекрытия заготовки кругом нагрузка при шлифовании будет возрастать.

При удалении припуска, когда заготовка смещается от колонны, фронтальный торец отжимается меньше, чем наружный. Существенного увеличения нагрузки при врезании с каждым поперечным ходом не происходит. Этому увеличению противодействует изгиб оправки, в ТС, при котором часть образующей круга поднимается над заготовкой. Однако концентрация нагрузки на передней части круга предполагает её быстрый износ.

Рабочая высота круга  $B_p$  принята равной трём поперечным подачам  $S_n$ , а ширина шлифуемой поверхности  $B_s$  – четырёх:  $B_p=3 \cdot S_n$ ,  $B_s=4 \cdot S_n$ . Подача на глубину по лимбу составляет  $t_n$ .

При этом недопустимо, чтобы ширина контакта в зоне выхода круга из контакта была существенно меньше, чем при входе, которая равна  $S_n$ . В противном случае величина врезания круга

в заготовку  $t$  будет больше расчетной величины  $t_1$ . Например, при  $S_n=0,4 \cdot B_p$  три поперечных хода стола обеспечивают перекрытие заготовки на величину  $3,6 \cdot S_n$ . Оставшаяся ширина контакта круга с заготовкой на четвертый ход составит  $0,4 \cdot S_n$ , т.е. в 2,5 раза меньше, чем за первый. Соответственно линейная нагрузка на круг ориентировочно будет в 2,5 раза больше. При этом, когда величина натяга соизмерима с припуском, глубина резания может быть существенно большей, чем при ширине врезания равной  $S_n$ . Это может привести к потере точности. При высокой удельной нагрузке возможно появление на укороченной поверхности прижогов и других дефектов. Максимум локальной нагрузки будет приходиться на область под кромкой круга, где может образоваться глубокая царапина.

Наибольший износ круга наблюдается по кромкам и на участках, удаляющих больший припуск. По мере изнашивания происходит перераспределение припуска с более нагруженных на соседние. Согласно рекомендациям [5], выход круга за края заготовки должен быть равен 1/3 от высоты круга, а согласно [6] – 0,5.

Проанализируем условия изнашивания кругов и формообразование поверхности заготовки при ограниченной жесткости ТС для различных направлений поперечной подачи.

Снятие припуска при ограниченной жесткости ТС происходит так же более рационально. Однако при этом в большей степени проявляется основной недостаток схемы – заостренная кромка цилиндрического круга формирует на заготовке относительно глубокую риску (царапину), в которой возможен дополнительный дефект – прижог.

Выполненный анализ показывает, что при приработке круг приобретает конусообразную форму при всех условиях удаления припуска.

На круге со временем формируется заборная часть за счет калибрующей. До полного врезания круга по его высоте (ширине) при каждом ходе (двойном ходе) величина удаляемого слоя первым (фронтальным) участком и последующими уменьшается. Увеличение длительности активного контакта заготовки (выхаживания) с вторым и последующими участками круга частично компенсирует это снижение. Участие калибрующих участков в работе увеличивает удельную отжимающую силу. Увеличение угла  $\alpha$  также перераспределяет нагрузку по ширине круга, уменьшая её на первом участке и увеличивая на конечной кромке. Кроме того, работая по схеме рис.5,а, равнодействующая сила смещается в сторону колонны, уменьшая плечо её приложения, тем самым несколько сдерживая упругую деформацию ТСПП. Применение конического круга позволяет работать всей его рабочей поверхностью.

По мере увеличения ширины контакта при работе, происходит разворот круга и большее врезание фронтального участка в заготовку. Другие участки разгружаются, выполняя калибрующие функции и обеспечивая стабильную шлифованную поверхность. Это позволяет исключить зарезы на поверхности заготовки, более полно использовать круг по высоте, повысить качество обработанной поверхности; упрощает управление процессом, которое можно обеспечить не только по силе  $P_z$  [2,11], но и силе  $P_y$ . База данных по силе  $P_y$  легко накапливается с использованием динамометра и данных по тарировке податливости. Однако динамометр должен быть весьма жестким и виброустойчивым.

Стабильность работы можно повысить за счет увеличения угла наклона образующей круга или за счет уменьшения подач (глубины резания  $t$ , продольной  $S_{np}$  и поперечной  $S_n$  подач), или за счет других мероприятий, позволяющих уменьшить угол  $\alpha_p$  до той величины, при которой основную работу будет выполнять фронтальный участок круга.

Малая жесткость плоскошлифовальных станков при малых нагрузках свидетельствует о наличии в ТСП люфтов, которые желательно выбирать перед работой. В первую очередь это необходимо при выхаживании, когда обеспечивается требуемое качество обработанной поверхности. В работе [8] за счет фиксации отдельных узлов станка жесткость повышена в 2-3 раза. При одной и той же производительности меньшие погрешности возникают при больших поперечных подачах, а круг более равномерно изнашивается при  $S_n = B_p$  и  $S_n = B_p/2$ . Исследования выполнялись на модернизированном станке 3Б713. Работали кругами 1 250-20-76 15АФ46М7В2 (ПП250×20×76 15А40НС17К8Б), а также характеристик: 23АФ46Н7В2 (23А40НС27К8Б), 25АФ60К7В2 (25А25НСМ17К203Б), 64СФ46 (64С40) и F60М7В2 (25НС17К3Б), 93АФ46Л3В (93А40НСМ23Б) и другими.

Правка проводилась алмазными карандашами, а также непрерывно в режиме чистки. Для непрерывной очистки использовались круги (ПП120×20×6 64СФ90Л7В (64С16СМ27К8), 1А20×25×6 ЛО200/160М7В (С10), 1А20×20×6 ЛО100/80 Л7В (С10), 1А25×20×6 СВС200/160 СЛ7В, где СВС – абразив, полученный методом самовоспроизводящего синтеза [8]. Методика проведения правки дана в работе [7]. Суть ее в следующем. Правящий круг вращается от пневмопривода А30/100. Поперечная подача его осуществляется микровинтом от микродвигателя и встроенного в общий корпус редуктора со скоростью 0,01÷1,0 мкм на 1 оборот рабочего круга. Компенсация износа рабочего круга производилась приводом с бесступенчатым регулированием, встроеным в цепь вертикального пере-

мещения шлифовальной бабки. Правящий круг от гидросистемы станка дополнительно перемещался по двум направляющим вдоль своей оси со скоростью 1 м/мин.

Форма рабочего круга самоорганизуется при работе и не изменяется при чистке. Подача ролика при правке была от 0,03 до 1 мкм на оборот рабочего круга. Примененный метод правки обеспечивает стабильность процесса шлифования, т. к. способен длительно поддерживать эффективный микропрофиль рабочего круга и его прирабатываемую форму, которая, в свою очередь, самоорганизуется при работе с постоянным натягом в ТС [7,10]. При отсутствии натяга контакт кругов прерывался. В противном случае форма рабочего круга может быть искажена. Применялась СОЖ-Укринол-1М. В качестве образцов применялись квадратные шайбы 20×20 мм толщиной 3,5 мм с диаметром отверстия 5 мм, которые ориентировались и закреплялись на магнитной плите с помощью рамки 200×100 мм. Материал шайб незакаленные и закаленные стали 45, ХВГ, Х12М, 40Х13, 4Х5В2ФС, Р6М5 и др. Режимы шлифования: скорость круга  $V_k = 33,7 \dots 31,2$  м/с, подачи – при глубине резания  $t_n = 0,05$  мм было сделано два прохода по всей ширине обработки со скоростью  $V_g = 3$  м/мин; при глубине  $t_n = 0,02$  мм сделано 5 проходов со скоростью 8 м/мин, поперечная подача в обоих случаях была равна 1/3 и 1/2 от высоты круга; т.е.  $S_n = 6,7$  мм/ход и 10 мм/ход.

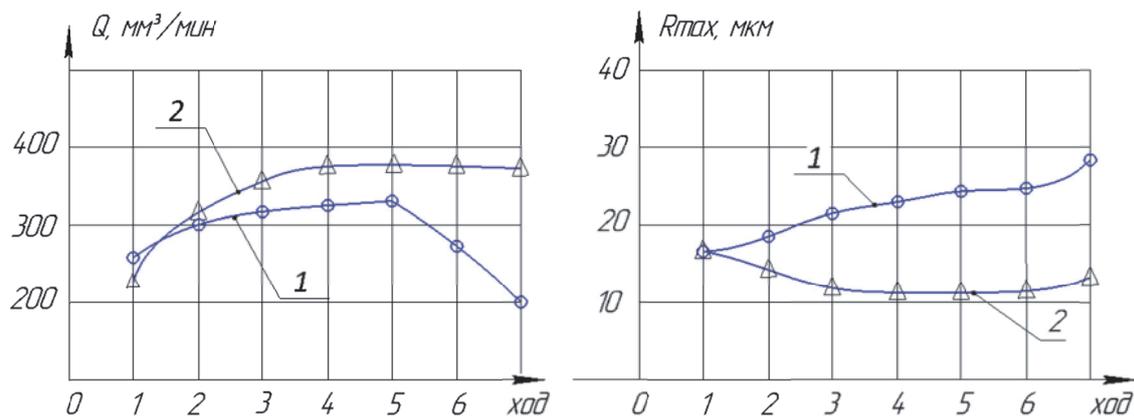
При подаче  $S_n = 1/3$  высоты круга (6,7 мм) число ходов с заданной подачей на глубину  $t$  за проход по всей ширине заготовки составляло  $100 \cdot 3/20 = 15$ , кроме того выполнялся дополнительный зачищающий ход. При  $S_n = 10$  мм общее число ходов – 11. То есть суммарная подача при обеих глубинах составляла 0,1 мм.

В известных исследованиях не выделяется роль краевых участков круга на появление абразивных рисок и прижогов на поверхности заготовки, а также не учитывается наличие разворота круга при работе.

На рис. 1 приведены показатели процесса при условиях шлифования, когда до эксперимента рабочий круг после правки алмазным карандашом имел цилиндрическую форму. При шлифовании цилиндрическим кругом, показатели процесса во многом зависят от направления продольной подачи: при подаче от колонны процесс протекает более эффективно.

Проанализируем показатели процесса при шлифовании закаленной стали Х12М (HRC 56..60) кругом 1 250 (ПП250) 25АФ60К7В2 (25А25НСМ17К203Б).

После первого хода, когда  $t_n = 0,05$  мм и  $S_n = 6,7$  мм/ход, рабочая часть круга после правки изнашивалась по диаметру на 4 мкм, с заготовок снято 28 мкм, т.е. натяг в ТС в конце 1 хода соста-



**Рис. 1.** Производительность процесса  $Q$  и максимальная шероховатость поверхности  $R_{max}$  при шлифовании с различным направлением поперечной подачи. Заготовка смещается: 1 – в сторону колонны, 2 – от колонны

вил  $(50-28-2)=20$ мкм, что соответствует усилию  $R=75$ Н и углу разворота торца круга  $\alpha = 20 \cdot 10^{-5}$  рад. Теоретическая разница в величинах отжатия торцов кругов составит  $-\alpha \cdot V_p = 20 \cdot 10^{-5} \cdot 20000 = 4$ мкм, практическая –  $(5-2)=3$ мкм. Величину отжатия круга от заготовки (заготовок) удобно фиксировать не по кромке круга, которая быстро осыпается, а на расстоянии величины  $S_n$  от неё. Высота макрогребешка на этом уровне теоретически составит  $\alpha \cdot S_n = \alpha \cdot V_p / 3 = 4/3$ мкм.

Указанные величины позволяют судить лишь о тенденциях отклонений. Практически измерить их сложно, т. к. шероховатость обработанной поверхности составляет  $R_z = 10 \div 12,5$  мкм.

Сразу после правки при шлифовании из круга выпадают ослабленные ею зерна, в первую очередь наиболее выступающие, а также из кромок круга (кромочный износ). Отношение длины погрешности к высоте составляет  $6700/1,7=3941,1$ , что предполагает по данным [8] характеризовать погрешность при плоском шлифовании как погрешность формы (для круглого шлифования по данным [8]-это соответствует волнистости).

Объем материала, снимаемый за 1 проход при  $t_n=0,05$ мм  $S_n=6,7$  мм,  $V_g=3$ м/мин,  $W=200 \cdot 6,7 \cdot 0,028=37,52$  за время  $240/3000=0,08$  мм. Производительность за ход стола  $Q=37,52/0,08=469$ мм³/мин (воздухошлифование 40мм). Производительность процесса  $Q=37,52/200=562,8$  мм³ / мин. При расчетах зазор между квадратными шайбами (заготовками) не учитывался.

После второго хода  $t=0,05$ мм с  $S_n=6,7$ мм/ход (2-й раз) фронтальным (основным) рабочим участком круга с заготовок снято 0,024 мм, радиальный износ части круга составил 0,002 мм. Износ фронтальной части круга, как наиболее выступающей при работе из-за изгиба оправки, предполагает врезание её на меньшую глубину. Натяг в ТС от действия усилий резания,

возникающих на фронтальной части должен уменьшаться. Однако вхождение в контакт новых участков круга, выполняющих зачистку поверхности после прохода фронтального участка, увеличивают отжатие.

Длина дополнительного контактного участка зависит от шероховатости обработанной поверхности  $R_z$ , соотношения отжатий и углов разворота круга. В условиях эксперимента при шероховатости  $R_z=12,5$  мкм на первом прошлифованном участке шероховатость  $\Delta$  уменьшилась на длине 3,5 мм, при  $\Delta=26$  мкм, что соответствует углу поворота торца круга  $\alpha = 27 \cdot 10^{-5}$  рад и усилию  $R=120$ Н.

После третьего хода, когда суммарная подача составила полную высоту круга угол  $\alpha=29 \cdot 10^{-5}$  рад,  $\Delta=29$  мкм,  $R=130$ Н. В дальнейшем увеличение угла  $\alpha$  связано с уменьшением режущей способности круга и появлением на круге заборной части.

Последний, 16-й ход, ознаменовался снятием срединной частью круга незначительного остаточного припуска, возникающего из-за износа фронтального участка, а так же появлением некоторого углубления на обработанной поверхности из-под зоны в районе задней кромки глубиной 2-3 мкм. Царапина четко просматривается на фоне крайнего участка заготовок, имеющего меньшую шероховатость -  $R_z=6 \div 10$  мкм, чем большая часть поверхности после 16-го рабочего хода заготовок на холостом ходе переместились в поперечном направлении в положение, которое она занимала до начала эксперимента. После чего производилось очередное врезание на глубину  $t_n=0.05$  мм. На практике холостого возврата заготовок в исходное положение не производят.

Во время первого прохода наибольшее углубление круга в заготовку произошло на 1-м ходу (28 мкм), меньше на 15 ходу (22 мкм). Наименьший сьем с заготовки был на 16-м, зачистном,

ходу - 8 мкм. Круг изнашивался по радиусу фронтального участка на 6 мкм за фактическое время контакта с заготовкой  $200 \times 16 / 2000 = 0,8$  мин, т. е. это приработочный износ. С целью исключения ситуации, при которой наличие уменьшенной поперечной подачи увеличивает неплоскостность шлифуемой поверхности, а также увеличения натяга при последующих ходах, величина поперечной подачи была уменьшена до  $S_n = 5$  мм. При этом было сделано 20 ходов.

После первого хода второго прохода, при котором суммарная подача на глубину составляла удвоенную величину подачи, минус съём материала с заготовки и износ круга:  $t_{\text{сум}} = 0,05 \cdot 2 - 0,028 - 0,006 = 0,066$  мм = 66 мкм с заготовки снято 0,033 мм. Заборная часть круга изнашивалась по радиусу примерно на 1,5 мкм. Натяг при работе составлял  $66 - 33 - 1,5 = 31,5$  мкм, что соответствует углу поворота круга  $\alpha = 40 \cdot 10^{-5}$  рад и нагрузке R несколько более 150Н. Удельная нагрузка составила  $p \geq 30$  Н/мм, для первого хода первого прохода она была  $p = 100 / 6,7 = 15$  Н/мм, т. е. более чем в 2 раза меньше.

При последующих ходах темп износа фронтальной части круга замедлился, режущая способность уменьшилась незначительно. На обработанной поверхности прослеживаются риски с шагом равным  $S_n = 5$  мм, глубина которых меньше теоретической, равной  $5000 \cdot 40 \cdot 10^{-5} = 2$  мкм. Они накладываются на шероховатую поверхность с  $Rz = 20$  мкм. Отношение длины этой погрешности к высоте  $5000 / 2 = 2500$ , что согласно [8], характеризуется как погрешность формы.

Общая разновысотность (неплоскостность) поверхности в поперечном направлении составила 10 мкм, т.е. она несколько уменьшилась при втором проходе, в котором отсутствовал ход с малой (остаточной) подачей. В продольном направлении, в зонах входа и выхода круга из контакта происходит «зарезание» краев заготовок на величину близкую к натягу в ТС при каждом ходе. Длина зарезов при входе примерно равна 2 -4-м длинам контакта круга с заготовкой, при выходе —  $1,5 \div 2$ . Глубина «зареза», образующаяся при укороченной поперечной подаче определяет величина припуска на последующую обработку на и/или продолжительность выхаживания.

Второй проход характеризовался значительной стабильностью, что несколько уменьшает время на выхаживание. Однако участие в работе только одной четвертой части высоты круга не позволяет рационально его использовать. Уменьшение высоты круга приводит к широко внедряемому в настоящее время процессу врезного шлифования узкими кругами, который имеет свои достоинства и недостатки.

Далее был сделан 3-й выхаживающий проход, без правки и подачи на глубину ( $t_n = 0$ ), при поперечной подаче  $S_n = 5$  мм.

При первом ходе фактическая подача на глубину составляла 31,5 мкм, удалено с заготовок 13 мкм. То есть фактическая глубина резания составила примерно 18,5 мкм,  $(31,5 - 13)$  что соответствует усилию натяга 5Н и углу разворота оси круга  $\alpha = 13 \cdot 10^{-5}$  рад. Глубина «зареза» уменьшилась до 13 мкм. Теоретическая глубина поперечной царапины равна 0,5 мкм.

При втором и последующих двух ходах натяг увеличивается, т. к. в работу включаются новые участки круга. При четвертом и последующих ходах круг работает всей поверхностью. После 4-ого хода средний размер заготовок на 1-ом входном участке уменьшился на 4 мкм – результат работы по выхаживанию по его поверхности второго, третьего, четвертого частей круга. При последующих ходах с увеличением фактического припуска увеличивается фактическая глубина резания. Разновысотность участков заготовок уменьшается по 20 ход, при котором край круга при работе совпадает с краем заготовки. После 20-го хода три участка заготовки шириной по 5 мм остаются частично необработанными всеми частями круга по сравнению с предыдущими.

При выполнении 21 хода условно третий участок заготовки будет обработан четвертой частью круга. При этом нагрузка на оставшиеся в контакте 2, 3, 4 части круга будут незначительными, т. к. вышедшей из контакта малоизношенной первой частью круга уже снята большая часть припуска. При значительном износе фронтальной части круга или наличии на ней заборного участка припуск перераспределяется на остальные участки круга. В условиях малой и относительно малой жесткости ТС весьма эффективно управлять деформацией за счет введения дополнительной нагрузки T, управляющей податливостью.

Исследованиями [5, 11, 15] установлено, что эффективность процесса шлифования как коническими, так и цилиндрическими кругами можно повысить за счет обеспечения условий шлифования, при которых их образующие будут близки к параллельному положению плоскости стола, а удельные нагрузки на их работающих участках квазипостоянны. Чтобы обеспечить эти условия необходимо иметь быстродействующую систему управления. Целесообразно, чтобы исходным сигналом для нее было изменение равнодействующей сил резания R, а при известных соотношениях между T, R,  $P_y$ ,  $P_z$  изменение мощности резания. Более точно управлять отжатием в ТС с помощью технологической силы  $P_y$ . Однако необходимость введения в ТС относительно нежесткого звена – динамометра, устанавливаемого на столе станка, уменьшает ее жесткость и виброустойчивость.

## ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В условиях ограниченной жесткости ТС:

1. Направление поперечной подачи может существенно влиять на процесс.
2. Необходимо обеспечивать работу всей поверхности шлифовального круга.
3. Целесообразно модернизация станков, позволяющая более эффективно их использовать.
4. Применение станков с ЧПУ, оснащенных быстродействующими жесткими приводами подач, позволит более существенно увеличить эффективность предлагаемых мероприятий.
5. Наибольшая эффективность процесса плоского шлифования может быть достигнута при использовании адаптивной системы управления.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балакшин Б.С. Основы технология машиностроения. М.: Машиностроение, 1969. 358 с
2. Дальский А.М. Технологическое обеспечение надежности высокопрочных деталей машин. М.: Машиностроение, 1975. 233 с.
3. Сулов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. М.: Машиностроение, 1987. 208 с.
4. Увеличение ресурса машин технологическими методами / В.А. Долецкий, В.Н. Бунтов, Ю.А. Легенкин и др. М.: Машиностроение, 1978. 216 с.
5. Альперович Т.А., Константинов К.Н., Шапиро А.Я. Наладка и эксплуатация шлифовальных станков. М.: Высшая школа, 1989. 240 с.
6. Соколовский А.П. Научные основы технологии машиностроения. – М.: Машгиз, 1955. 515 с.
7. Внутреннее шлифование с продольной подачей / П.М. Салов, Д.П. Салова, Т.Г. Виноградова и др. Чебоксары: Чув. гос. ун-т. 2012. Деп. в ВИНТИ 22.06.12, №286-В 2012. 56 с.
8. Прилуцкий В.А. Технологические методы снижения волнистости поверхностей: в 2-х т. Изд. 2 - е. М.: Машиностроение, 2012. Т.1. 306 с.
9. Филимонов Л.Н. Плоское шлифование. Л.: Машиностроение, 1985. 109 с.
10. Салов П.М., Кравченко Б.А. Принципы самоорганизации износа шлифовальных кругов. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2001. 118 с.
11. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. М.: Машиностроение, 1975. 176 с.
12. Кремень З.И., Юрьев В.Г., Бабошкин А.Ф. Технология шлифования в машиностроении. СПб.: Политехника, 2007. 424 с.
13. Носов Н.В. Абразивная обработка деталей инструментами из СВС-материалов. Самара: Сам.гос. ун-т. 2005. 302 с.
14. Горшков Б.М. Повышение точности технологических обрабатываемых систем с составными станинами методом автоматической компенсации их деформаций: дис. ... докт. тех. наук. 05.03.01. Защищена 12.10.05. Утв. 20.01.06 / Горшков Борис Михайлович. Тольятти, 2005, 358 с.
15. Зубарев Ю.М., Приемышев А.В. Теория и практика повышения эффективности шлифования материалов: Учебное пособие. СПб.: Лань, 2010. 304 с.

## FORMATION OF SURFACE IN FLAT GRINDING

© 2018 P.M. Salov<sup>1</sup>, A.F. Denisenko<sup>2</sup>, D.P. Salova<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, Cheboksary

<sup>2</sup> Samara State Technical University

<sup>3</sup> JSC «Electropribor», Cheboksary

In the article results of research of process of grinding in the conditions of the limited rigidity of technological system are resulted. It is established that in the direction of the transverse flow can significantly affect the process, so it is necessary to ensure the operation of the entire surface of the grinding wheel. In addition, it is advisable to modernize the machines that allow them to be used more efficiently. To this end, it is proposed to use CNC machines equipped with high-speed hard drives of feeds, which will significantly increase the efficiency of the proposed activities. It is shown that the greatest efficiency of the flat grinding process can be achieved by using an adaptive control system.

Keywords. Flat grinding, wear, cutting modes, drive stiffness, adaptive system, allowance, correction, vibration resistance.

Alexander Denisenko, Doctor of Technics, Professor, Head at the Automated Machine and Tool Systems Department.

E-mail: ask@samgtu.ru

Petr Salov, Doctor of Technics, Professor.

E-mail: msfkafedratm@yandex.ru

Dina Salova, Chief Technologist. E-mail: sgt@elpribor.ru