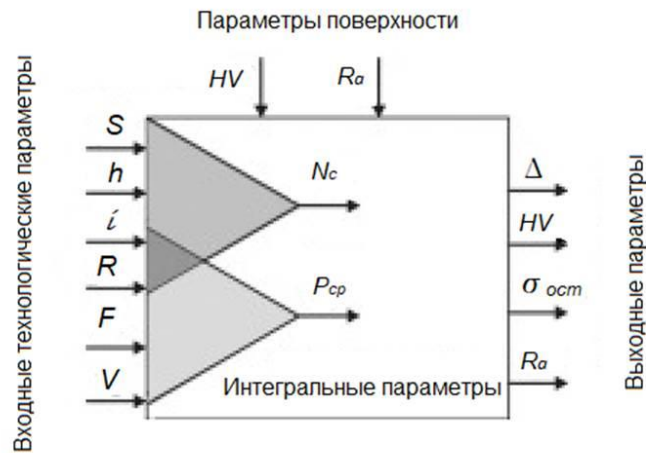


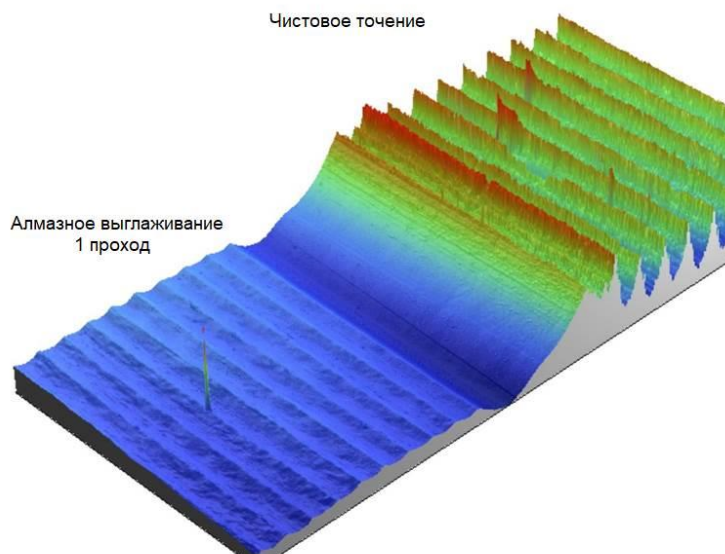
## **4.4 Пути достижения качества и точности деталей алмазным выглаживанием**

## Алмазное выглаживание. Параметры процесса



На процесс алмазного выглаживания, целью которого является обеспечение характеристики качества, оказывают влияние входные технологические факторы. Сверху вниз на схеме это подача, глубина внедрения инструмента или натяг, количество рабочих ходов, радиус поверхности инструмента, сила и скорость выглаживания. Суммарное их воздействие описывается интегральными показателями к которым относят например, среднее удельное давление  $P_{ср}$ . В тоже время процесс подвержен влиянию исходной твердости и шероховатость поверхности, а так же других показателей качества заготовки, например биения и показателей упругопластических свойств металла. Характеристика качества оценивается выходными параметрами процесса, к которым относят шероховатость и твердость поверхности или степень наклепа, величина и глубина залегания остаточных напряжений, отклонения формы поверхности, волнистость и другие.

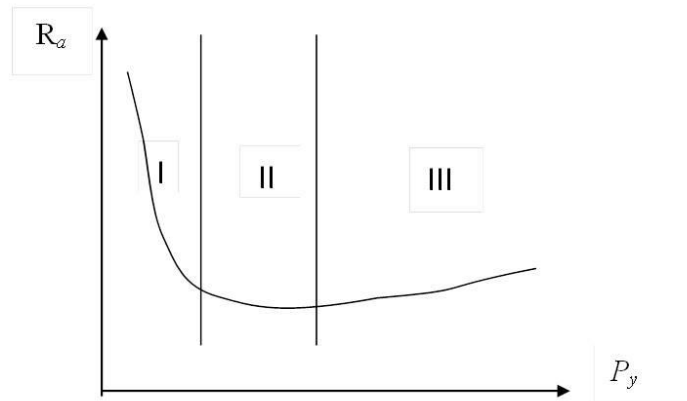
## Алмазное выглаживание. Шероховатость поверхности



Особенности пластического течения металла определяют образование шероховатости как результата: во-первых, заполнения металлом выступов микронеровностей близлежащих впадин, сдвигаемых в результате воздействия инструмента; во вторых, искажения поверхности, происходящего вследствие течения металла в сторону, противоположную направлению движения подачи; и в третьих, неполного сглаживания исходной шероховатости. При этом, безусловно важно учитывать влияние технологической наследственности. Нестабильность параметров шероховатости обусловлена, главным образом, влиянием неучитываемых или неконтролируемых факторов, например вибрации.

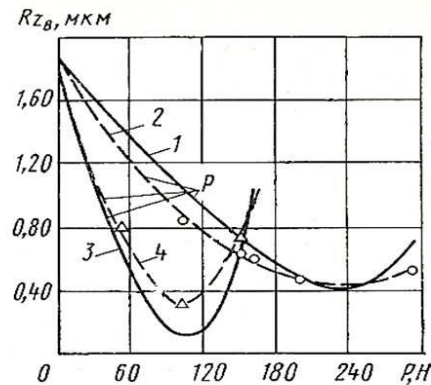
Шероховатость поверхностей, обработанных алмазным выглаживанием, нормируют только в одном направлении. Поперечная шероховатость, измеряемая в направлении подачи, превосходит, продольную шероховатость, измеряемую в направлении скорости выглаживания. Это объясняется тем, что основные факторы, определяющие образование поперечной шероховатости (форма и размеры алмазного наконечника, а также величина подачи), практически не влияют на высоту продольной шероховатости. При этом зависимость между высотой образующихся при выглаживании неровностей, радиусом выглаживающего наконечника и величиной подачи выдерживается значительно более строго, чем при всех видах резания. Эта зависимость может быть использована для расчета высоты неровностей с достаточной для практики точностью.

Зависимость шероховатости поверхности  
от усилия выглаживания



Преобладание того или иного фактора в формировании шероховатости зависит от применяемых режимов выглаживания. На шероховатость поверхности сильное влияние оказывает радиальное усилие выглаживания. Все исследователи отмечают одинаковый характер этой зависимости, которую в общем случае можно определить вот такой кривой. Ее можно разделить на три участка. Участок I отличается резким уменьшением шероховатости при незначительном увеличении усилия. В этот момент происходит смятие микровыступов и заполнение объемов впадин. На участке II происходит окончательное перераспределение объемов металла. При достижении определенного радиального усилия высота неровностей поверхности достигает наименьшего значения. Дальнейшее повышение усилия не приводит к уменьшению шероховатости, а в ряде случаев она увеличивается (участок III). И так, при некотором усилии, различном для каждого материала, наступает момент, когда увеличение нагрузки не приводит к повышению качества обработки поверхности. При этом усилии, называемом оптимальным, происходит такое изменение микропрофиля поверхности, когда материал исходных гребешков микронеровностей, перераспределился и целиком заполнил впадины. С дальнейшим увеличением нагрузки глубина внедрения инструмента возрастает и наступает момент, когда обтекание материала сменяется его затормаживанием, что приводит к возрастанию шероховатости обработанной поверхности.

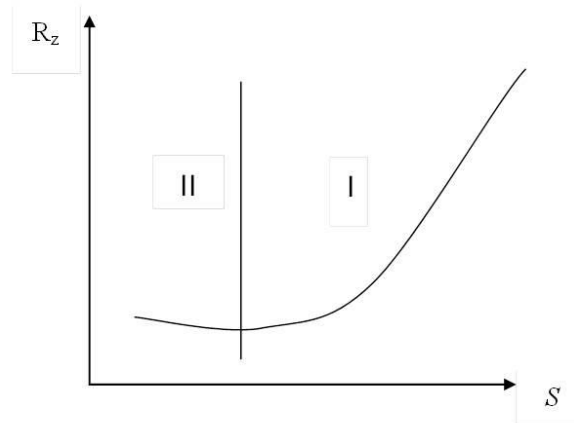
## Алмазное выглаживание. Шероховатость поверхности



Зависимость высоты шероховатостей  $Rz$  от усилия выглаживания  $P$  для:  
2 — закаленной стали 40X, HRC 65; 4 — Д16Т

Такое качественное изменение шероховатости поверхности при росте нагрузки на инструмент является характерным при выглаживании большинства материалов. Например, при выглаживании закаленной стали и дюрала характер кривых одинаковый, а точка оптимального усилия различается почти в два раза. Увеличение радиуса инструмента при оптимальном сглаживающем усилии ведет к увеличению площади поверхностного контакта, снижению контактного давления, а следовательно, к уменьшению деформации исходных микронеровностей. Следует иметь в виду, что вследствие большой разницы в механических свойствах обрабатываемых материалов для каждого материала следует применять различные радиусы инструмента. Мягкие материалы и покрытия выглаживаются при больших радиусах, 3-4 мм. Закаленные стали требуют применения алмаза с радиусом сферы до 2 мм, так как при их выглаживании алмазом с радиусом больше 2 мм необходимо значительное увеличение усилия, которое может привести к поломке алмаза.

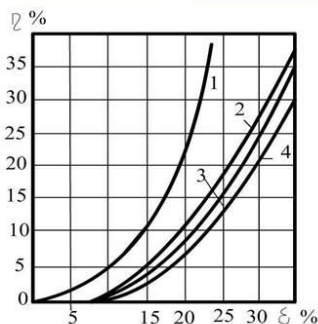
### Зависимость шероховатости поверхности от подачи



Величина подачи инструмента, как и его радиус, влияет на площадь поверхностного контакта. Так, с уменьшением подачи, площадь контакта будет снижаться, а это приводит к увеличению давления в зоне контакта инструмента с обрабатываемым материалом, что в свою очередь, ведет к возрастанию деформации поверхностного слоя. На участке I в образовании шероховатости доминирующую роль играет винтовой характер движения инструмента, а участок II представляет собой почти горизонтальную прямую, иногда несколько загнутую вверх в диапазоне малых подач. Здесь высота неровностей зависит во многом от пластических свойств материала, поскольку в этом случае значительную роль в формировании шероховатости играет вторичное течение металла в сторону, обратную движению инструмента. С практической точки зрения имеет значение подача, соответствующая переходу одного участка кривой в другой. Такая подача обеспечивает при максимальной производительности минимальную шероховатость поверхности.

## Алмазное выглаживание. Опорная способность поверхности

Методы обработки	Шероховатость, Ra	Опорная часть профиля $t_p, \%$	Опорная часть площади $t_p, \%$
Алмазное выглаживание	0,08	87	50
	0,04	98	60
Доводка	0,08	35	12
Полирование	0,08	22	8
	0,04	30	10



Начальные участки кривых опорных поверхностей, обработанных: 1 – алмазным выглаживанием; 2 – полированием; 3 – доводкой; 4 – шлифованием

На долговечность деталей машин оказывает влияние не только высота неровностей поверхности, но и форма микровыступов, характер распределения их по высоте, что в конечном итоге определяет их опорную способность. В таблице приведены данные об опорной способности поверхностей, обработанных различными методами. Как видно алмазное выглаживание сопоставимо по достижимым высотным параметрам шероховатости с такими процессами как полирование и доводка. Но в отличие от них формирует лучшую несущую способность поверхности. Так как наибольшее влияние на эксплуатационные свойства поверхности оказывает верхняя часть ее микрорельефа, то можно произвести оценку опорной площади по начальному участку опорной кривой. Участки опорных кривых для удобства их сравнения построены в координатах, за начало которых принята верхняя точка опорной кривой. По оси абсцисс откладывается величина относительного сближения  $\delta$ , а по оси ординат - величина относительной площади. Как видно из графика, начальный участок опорной кривой, соответствующий алмазному выглаживанию, находится левее остальных. Это свидетельствует о том, что на всех рассматриваемых уровнях сближения величина опорной площади выглаженной поверхности больше, чем поверхности, обработанной абразивом.



## Алмазное выглаживание. Геометрическая точность поверхности

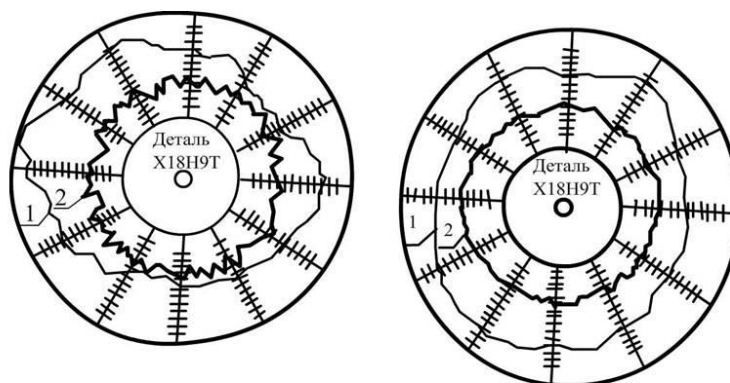


Диаграмма круглости (1) и волнистости (2): после точения (слева) и после жесткого алмазного выглаживания (справа)

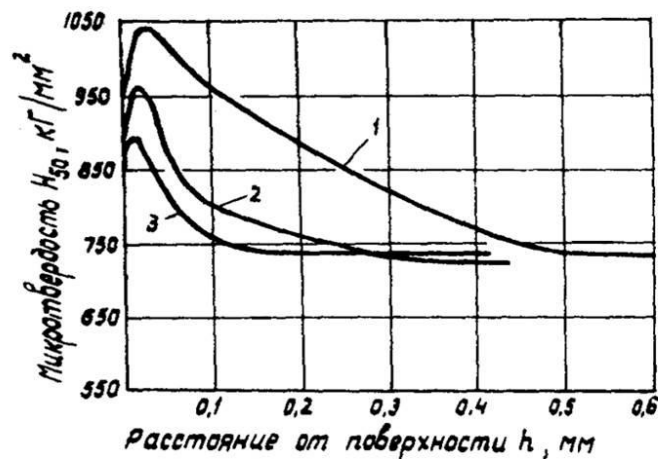
Как правило, обработке алмазным выглаживанием подвергаются поверхности деталей сопряженные с другими деталями. Сопряжение осуществляется по 6-7-му квалитетам точности, следовательно, размерная и геометрическая точность выглаженных поверхностей должна быть достаточно высокой. При упругом контакте инструмента с деталью погрешности формы, полученные на предшествующей обработке, в основном сохраняются, размер же изменяется в пределах высоты шероховатости. Поэтому припуска под выглаживание обычно не предусматривают. При этом предварительная обработка должна обеспечить точность размеров и точность формы. Однако волнистость поверхности в некоторых случаях увеличивается, так как упругое выглаживание склонно к вибрациям.

При обработке инструментом с жестким контактом точность геометрической формы в поперечном сечении детали может быть увеличена по сравнению с исходной. Увеличение точности можно объяснить следующим образом. Движение инструмента осуществляется по поверхности, на которой имеются выступы, образующие отклонения реального профиля от номинального. Инструмент, встречая выступ, должен затратить на его деформирование дополнительную силу. Величина этой силы зависит от размеров выступа, скорости движения инструмента, его жесткости. При упругом выглаживании жесткость системы мала, вследствие чего усилие невелико и инструмент огибает единичный выступ, не деформируя его. При жестком выглаживании наоборот, она значительна, и возникающая локальная сила способна произвести деформацию выступа. Наиболее интенсивно исправляются погрешностей формы типа некруглости, а также волнистость, и менее интенсивно – овальность, которые определяются на приборе под названием кругломер, формирующий



полярную диаграмму круглости, представленную на слайде. Статистический анализ погрешности геометрической формы до и после выглаживания показал, что применения жесткого выглаживания позволяет уменьшить некруглость на 20-50 %, овальность - на 10-20%. Но при выглаживании жестко закрепленным инструментом наблюдается колебание силы выглаживания вследствие наличия исходных погрешностей формы, что может сказаться на других показателях качества.

## Алмазное выглаживание. Микротвердость поверхности

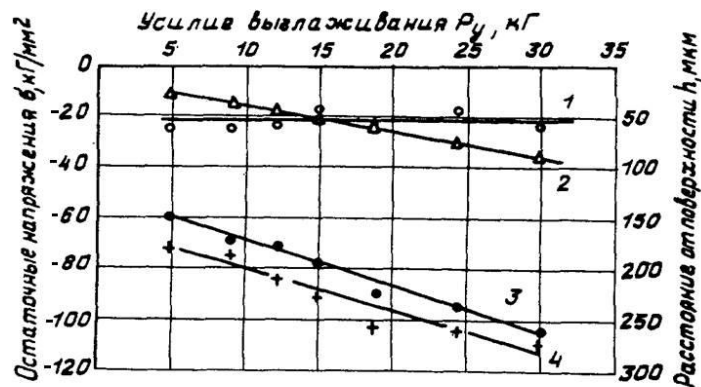


Изменение микротвердости по глубине поверхностного слоя закаленной стали 45, HRC 56 при выглаживании алмазом:  $R = 1,3$  мм

1 -  $P_y = 230$  Н; 2 -  $P_y = 140$  Н; 3 -  $P_y = 55$  Н

Из всех механических характеристик металла, меняющихся в результате упрочнения, наиболее просто и надежно определяется изменение микротвердости. Им пользуются и для нахождения степени упрочнения металла. С увеличением силы выглаживания поверхностная твердость возрастает до определенного предела. Наиболее значительный прирост микротвердости поверхности наблюдается до глубины 50-100 мкм. Максимальная же глубина изменения твердости практически не превышает 300-400 мкм. Дальнейшее увеличение усилия выглаживания не приводит к росту твердости, наоборот, наблюдается ее снижение. В поверхностном слое детали при этом возникают такие напряжения, при которых начинается его разрушение. Величина подачи инструмента при алмазном выглаживании также оказывает влияние на микротвердость поверхностного слоя. С уменьшением подачи возрастают максимальная и поверхностная микротвердость, а так же глубина слоя повышенной микротвердости. При подачах, меньших  $S = 0,02$  мм/об, происходит уменьшение микротвердости поверхности связанное с некоторым ее перенаклепом, вследствие чрезмерной кратности приложения нагрузки. Увеличение числа проходов ведет к повышению твердости, но в меньшей степени, чем при первом ходе, т.к. при последующих проходах этот процесс затрудняется из-за значительно упрочнения при первом рабочем ходе. На оптимальных режимах можно повысить микротвердость: у алюминиевых сплавов на 10-15%., у сталей на 30-50%.

## Алмазное выглаживание. Остаточные напряжения



Зависимость остаточных напряжений и глубины их залегания под поверхностью от усилия выглаживания стали:  
1 - поверхностные остаточные напряжения;  
2 - глубина залегания максимальных напряжений;  
3 - максимальные напряжения сжатия;  
4 - глубина распространения напряжений сжатия.

Важной характеристикой качества поверхности наряду с ее микрогеометрией, глубиной и степенью упрочнения являются остаточные напряжения в поверхностном слое. Эти напряжения в значительной мере определяют эксплуатационные свойства деталей машин. Остаточные напряжения могут быть причиной появления дефектов в процессе производства деталей и вызывать их растрескивание, коробление и т.д. Исследования рядов авторов показали, что при алмазном выглаживании в поверхностных слоях детали возникают сжимающие напряжения. Величина и характер их распределения зависят от режимов алмазного выглаживания, геометрии алмаза и его природы, конструкции детали, а также от материала обрабатываемого изделия. График изменения некоторых характеристик напряженного состояния поверхностного слоя после алмазного выглаживания от усилия обработки представлен на комплексной диаграмме. Следует отметить, что в диапазоне усилий от 5 до 30 кг, т.е. до 300Н значительных изменений поверхностных остаточных напряжений не наблюдается. Величина максимальных напряжений сжатия повышается до  $110 \text{ кг/мм}^2$ , увеличивается и глубина их залегания до 80 мкм. Общая глубина распространения напряжений сжатия возрастает с повышением усилия выглаживания и достигает 280 мкм. Изменение подачи оказывает меньшее влияние на распределение остаточных напряжений по глубине поверхностных слоев. Увеличение количества проходов инструмента до 5 приводит к повышению максимума сжимающих остаточных напряжений и глубины их залегания, поверхностные напряжения практически не изменяются. Применение инструмента из природного алмаза дает большие сжимающие напряжения. Причина в низком качестве поверхности синтетического алмаза и, соответственно, возрастании сил трения, приводящих к снижению эффекта упрочнения на поверхности.

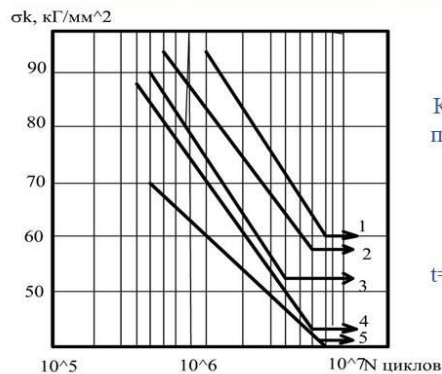
## Алмазное выглаживание. Режимы выглаживания

Материал	Усилие выглаживания Р, Н	Подача S, мм/об	Радиус инструмента R, мм
Закаленные стали, HRC 65	150-250	0,02-0,03	0,5-1,5
Термо-обработанные стали, HRC 40	100-200	0,03-0,05	1-2
Цветные металлы и сплавы	50-250	0,05-0,1	2-4

Режимы выглаживания выбираются исходя из обеспечения необходимых требований качества поверхности. Обязателен контроль режимов для специальных технологических процессов. Рекомендации по режимам выглаживания различных материалов приведены в таблице. Однако они подходят для сглаживающе-упрочняющего режима, для повышения степени упрочнения необходимо увеличивать удельное давление.

## Алмазное выглаживание. Обработка покрытий

Покрытие	Микротвёрдость, кгс/мм <sup>2</sup>	Усилие выглаживания, Н	Радиус сферы алмаза, мм
Кадмиевое	40	30-50	3,5
Никелевое	230-300	120-180	2,5-3,5
Хромовое	1000	120-140	1,2-1,8



Кривые контактно-усталостной прочности хромового покрытия:  
 1 - алмазное выглаживание, t=200°C; 2 - алмазное выглаживание, t=100°C;  
 3 - алмазное выглаживание, t=50°C; 4 - полирование, t=50°C;  
 5 - полирование, t=100°C.

Алмазному выглаживанию подвергаются детали с нанесенными металлическими покрытиями. Выглаживание покрытий способствует повышению их долговечности в том числе и при работе деталей с повышенными температурами, устранению трещин в покрытии. Лучший результат получается при выглаживании хромированных деталей. При этом для достижения эффекта алмазное выглаживание необходимо выполнять как до, так и после нанесения покрытия. Кроме того, покрытия подвергнутые обработке алмазным выглаживанием имеют повышенную коррозионную стойкость.