

## ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Загороднюк Т.С.

*Бөлшектің беткі қабатындағы қалдық кернеуді реттеу машина бөлшектерінің пайдаланылу қасиеттерінің үлкен қорының пайда болуын қамтамасыз етеді. Бөлшектің беткі қабатының қалдық кернеулерінің таралу шамасы, таңбасы және тереңдігі кескіш құралдың механикалық өңделуі мен геометриясының түріне және тәртібіне байланысты өзгеріп отырады.*

*Regulation of residual pressure in a superficial layer of a detail represents the big reserve of rise of operational properties of details of machines. The size, sign and depth of distribution of residual pressure of a superficial layer of a detail change depending on a kind and a mode of machining and geometry of the cutting tool.*

Долговечность работы деталей машин и их эксплуатационные свойства в значительной степени зависят от состояния их поверхностного слоя. Под качеством поверхности понимают состояние поверхностного слоя как результат воздействия на него одного или последовательного комплекса технологических методов. Оно характеризуется шероховатостью, волнистостью, а также физико-механическими свойствами поверхностного слоя. Физико-механические свойства поверхностного слоя характеризуются его твердостью, структурными и фазовыми превращениями, величиной, знаком и глубиной распространения остаточных напряжений, деформацией кристаллической решетки материала. Регулирование остаточных напряжений в поверхностном слое детали представляет собой большой резерв повышения эксплуатационных свойств деталей машин.

Физико-механические свойства поверхностного слоя деталей машин изменяются под действием комплексного воздействия силовых и тепловых факторов в процессе обработки. При обработке лезвийными инструментами преобладающее воздействие оказывают силовые факторы. Результатом силового воздействия при пластической деформации является разрушение структуры, повороты и смещения кристаллов и наклеп поверхностного слоя, характеризуемый повышением микротвердости и снижением вязкости. В поверхностном слое стальных деталей наблюдаются три зоны:

а) зона резко выраженной деформации; она характеризуется значительными искажениями кристаллической решетки, измельченными зернами, завихренным строением структурных составляющих и резким повышением микротвердости;

б) зона деформации, характеризуемая вытянутыми зернами, наволакиванием одних зерен на другие и значительным снижением микротвердости сравнительно с верхним слоем;

в) переходная зона, представляющая собой зону влияния деформации и постепенного перехода к нормальному строению основного металла /1/.

Возникновение остаточных напряжений в поверхностном слое при механической обработке заготовок объясняется следующими основными причинами.

1. При воздействии режущего инструмента на поверхность обрабатываемого металла в его поверхностном слое протекает пластическая деформация, сопровождающаяся упрочнением и изменением некоторых физических свойств металла. Пластическая деформация металла вызывает уменьшение его плотности, а следовательно, обуславливает рост удельного объема, достигающий 0,3-0,8 % удельного объема до пластической деформации. Увеличение объема металла распространяется только на глубину проникновения пластической деформации и не затрагивает слоев металла, лежащих ниже.

Увеличению объема пластически деформированного металла поверхностного слоя препятствуют связанные с ним недеформированные нижележащие слои; в результате этого в наружном слое возникают сжимающие, а в нижележащих слоях - растягивающие остаточные напряжения.

2. Режущий инструмент, снимающий с обрабатываемой поверхности элементарную стружку, вытягивает кристаллические зерна металла подрезцового слоя, которые при этом претерпевают упругую и пластическую деформации растяжения в направлении резания. Трение задней поверхности режущего инструмента об обрабатываемую поверхность (в свою очередь) способствует растяжению кристаллических зерен металла поверхностного слоя. После удаления режущего инструмента пластически растянутые верхние слои металла, связанные как единое целое с нижележащими слоями металла, приобретают остаточные напряжения сжатия, ориентированные по направлению резания. Соответственно этому в нижележащих слоях развиваются уравновешивающие их остаточные напряжения растяжения. При этом в направлении, перпендикулярном к направлению скорости резания (т.е. в направлении подачи), тоже протекают упругая и пластическая деформации кристаллических зерен, вызывающие возникновение остаточных напряжений, ориентированных в направлении скорости резания.

3. При отделении от обрабатываемой поверхности сливной стружки (обработке пластичных металлов при соответствующих условиях резания) после пластического вытягивания кристаллических зерен металла поверхностного слоя в направлении резания происходит их дополнительное вытягивание под влиянием связанной с обрабатываемой поверхностью стружки по направлению схода сливной стружки, т.е. вверх. В этом случае может произойти полное переформирование кристаллических зерен поверхностного слоя (вытягивание в вертикальном и сжатие в горизонтальном направлениях), что приведет к появлению в направлениях скорости резания и подачи остаточных напряжений растяжения.

4. Выделяющаяся в зоне резания теплота мгновенно нагревает тонкие поверхностные слои металла до высоких температур, что вызывает увеличение его удельного объема. Однако в разогретом слое не возникают внутренние напряжения в связи с тем, что модуль упругости металла снижается до минимума, а пластичность возрастает. После прекращения воздействия режущего инструмента происходит быстрое охлаждение металла

поверхностного слоя, сопровождающееся сжатием; этому препятствуют нижележащие слои металла, оставшимися холодными. В результате во внешних слоях металла развиваются остаточные напряжения растяжения, а в нижележащих слоях – уравнивающие их напряжения сжатия.

5. При обработке металлов, склонных к фазовым превращениям, нагрев зоны резания вызывает структурные превращения, связанные с объемными изменениями металла. В этом случае в слоях металла со структурой, имеющей больший удельный объем, развиваются напряжения сжатия, а в слоях со структурой меньшего удельного объема - остаточные напряжения растяжения. Например, если сталь с мартенситной структурой шлифуется засаленным кругом при недостаточном охлаждении или неправильном режиме, то происходит прижог, приводящий к образованию на отдельных участках структур троостита или сорбита, имеющих меньший удельный объем, чем структура мартенсита. В этих отожженных слоях развиваются остаточные напряжения растяжения, а в смежных с ними слоях – уравнивающие их напряжения сжатия. Прижоги шлифуемой поверхности являются серьезной причиной снижения долговечности деталей машин.

Любая из вышукказанных причин при обработке металлов резанием может преобладать над другими. При этом она будет определять величину и характер распределения остаточных напряжений. Однако если все названные причины достаточно сильно влияют на свойства поверхностного слоя, то окончательное распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя приобретает весьма сложный характер /2/.

Изменение видов и режимов обработки меняет характер напряженного поля в зоне резания и удельное значение теплоты в составе причин, влияющих на образование остаточных напряжений. В связи с этим изменяется как величина, так и знак остаточных напряжений металла поверхностного слоя.

В большинстве случаев изменение видов обработки и режимов резания, приводящих к увеличению влияния силового поля и повышению степени пластической деформации, вызывает рост остаточных напряжений сжатия и снижение растягивающих напряжений за исключением обработки пластичных металлов, когда повышение влияния силового поля может привести к усилению растягивающих и уменьшению сжимающих напряжений.

Изменение режимов резания и условий обработки, влекущее за собой повышение мгновенной температуры нагрева металла поверхностного слоя и усиливающее этим влияние теплового фактора (повышение скорости резания, увеличение засаливания абразивного круга при шлифовании, снижение теплопроводности обрабатываемого металла и режущего инструмента, увеличение длительности соприкосновения отдельных участков обрабатываемой поверхности с режущим инструментом, являющимся источником нагревания металла поверхностного слоя, ухудшение условий охлаждения и т.п.), обуславливает рост остаточных напряжений сжатия или превращения сжимающих остаточных напряжений в растягивающие.

Знак и глубина распространения остаточных напряжений, возникающих в результате фазовых превращений металла поверхностного слоя, определяются полнотой протекания фазовых превращений и соотношением удельных объемов структурных составляющих смежных слоев металла поверхностного

слоя. При этом очень большое значение для формирования остаточных напряжений имеют химический состав металла и его способность к структурным изменениям, пластичность, упругость, теплопроводность и температуропроводность и другие механические и физические свойства обрабатываемого металла.

При точении остаточные напряжения возникают под влиянием одной из вышеуказанных причин или формируются в результате одновременного воздействия всех или части этих причин. Окончательная величина, знак, глубина распространения и характер эпюры остаточных напряжений поверхностного слоя после точения зависит от степени воздействия каждой из причин, участвующих в формировании остаточных напряжений.

Влияние скорости резания при точении чаще всего проявляется в изменении теплового воздействия (с повышением скорости резания количество теплоты, выделяющейся в зоне резания, возрастает) и в изменении продолжительности теплового и силового влияния на металл поверхностного слоя со стороны инструмента.

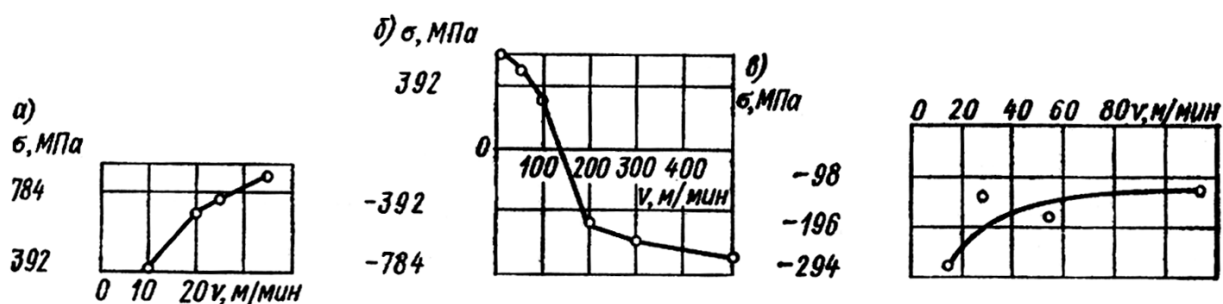


Рис.1 Влияние скорости резания на остаточные напряжения при точении (по материалам П.Е. Дьяченко, Н.А. Подосеновой, Г.А.Дерягина Б.А.Кравченко)

При обработке пластичных материалов, например стали ЭИ437Б (рис.1, а), когда под действием напряженного поля стружки в металле поверхностного слоя возникают остаточные напряжения растяжения, повышение скорости резания приводит к появлению дополнительных тепловых растягивающих напряжений, увеличивающих общую величину остаточных напряжений растяжения.

При обработке пластичных материалов, воспринимающих закалку, например стали 30ХГС (рис.1, б), увеличение количества теплоты в зоне резания, связанное с повышением скорости резания, может привести к закалке металла поверхностного слоя, полнота протекания которой возрастает с увеличением температуры нагрева, а следовательно, и скорости резания. Увеличение удельного объема металла поверхностного слоя при его закалке приводит к снижению остаточных напряжений растяжения, формирующихся при малых скоростях резания, и превращению их в напряжения сжатия при обработке на больших скоростях.

При обработке малопластичных материалов резанием с образованием элементной стружки, при которой формируются остаточные напряжения сжатия, повышение скорости резания может вызвать появление

дополнительных тепловых остаточных напряжений растяжения, приводящих к уменьшению сжимающих и даже к образованию растягивающих напряжений.

При точении закаленных материалов увеличение нагревания поверхностного слоя, связанное с возрастанием скорости резания, может вызвать отпуск металла и уменьшение его удельного объема, что приводит к снижению остаточных напряжений сжатия, возникающих под влиянием напряженного поля передней поверхности инструмента при малых скоростях резания (рис.1, в). В примере, приведенном на рис.1, в, увеличение скорости резания закаленной стали 45ХНМФА с 10 до 110 м/мин сопровождалось понижением микротвердости металла поверхностного слоя с 6340 до 5400 МПа.

Увеличение подачи приводит к росту пластической деформации металла поверхностного слоя, вызываемой силовым полем, поэтому при обработке пластичных металлов, например жаропрочных сталей ЭИ766 (1) и ЭИ37Б (2) (рис.2, а), у которых под действием напряженного поля стружки формируются растягивающие остаточные напряжения, увеличение подачи сопровождается ростом остаточных напряжений растяжения. Рост подачи при точении малопластичных материалов, например титанового сплава ВТ6 (рис.2, б), вызывает увеличение пластической деформации, остаточных напряжений сжатия (3) и глубины их проникновения в металл поверхностного слоя (4).

При обработке малопластичных закаленных материалов, например сталей 30ХГСНА (5) и 30ХГСА (6) (рис.2, в), увеличение подачи приводит к значительному повышению температуры в зоне резания, что может вызвать появление тепловых растягивающих напряжений, снижающих общую величину остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое.

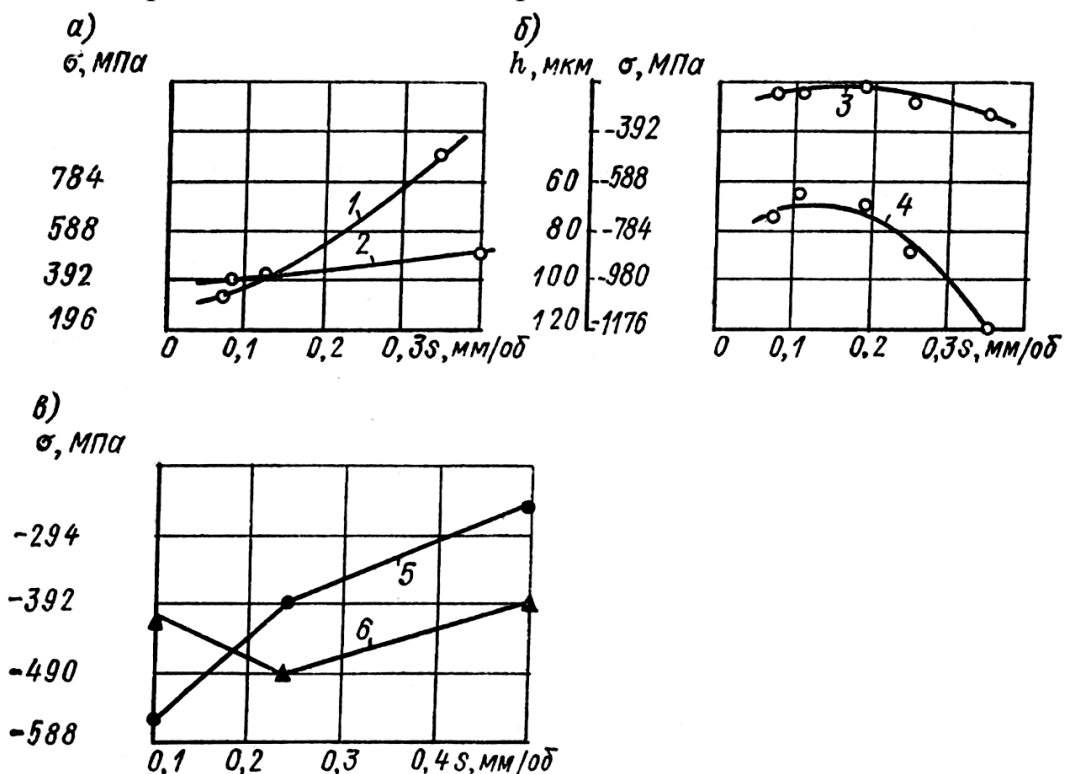


Рис.2 Влияние подачи на формирование остаточных напряжений при точении (по материалам П.Е. Дьяченко, Н.А. Подосеновой, Г.А.Дерягина Б.А.Кравченко)

Увеличение подачи приводит к росту пластической деформации металла поверхностного слоя, вызываемой силовым полем, поэтому при обработке пластичных металлов, например жаропрочных сталей ЭИ766 (1) и ЭИ37Б (2) (рис.2, а), у которых под действием напряженного поля стружки формируются растягивающие остаточные напряжения, увеличение подачи сопровождается ростом остаточных напряжений растяжения. Рост подачи при точении малопластичных материалов, например титанового сплава ВТ6 (рис.2, б), вызывает увеличение пластической деформации, остаточных напряжений сжатия (3) и глубины их проникновения в металл поверхностного слоя (4).

При обработке малопластичных закаленных материалов, например сталей 30ХГСНА (5) и 30ХГСА (6) (рис.2, в), увеличение подачи приводит к значительному повышению температуры в зоне резания, что может вызвать появление тепловых растягивающих напряжений, снижающих общую величину остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое.

С уменьшением положительного переднего угла и увеличением отрицательного угла резца повышается пластическая деформация металла поверхностного слоя, а, следовательно, и его удельный объем, что сопровождается возрастанием остаточных напряжений сжатия. При точении пластичных металлов остаточные напряжения растяжения снижаются, а при точении малопластичных материалов остаточные напряжения сжатия возрастают.

С усилением износа режущего инструмента возрастают трение его задней поверхности об обработанную поверхность изделия и радиус округления режущей кромки, что приводит к увеличению пластической деформации металла поверхностного слоя и глубины ее распространения. В связи с этим при обработке пластичных материалов с затуплением режущего инструмента возрастают остаточные напряжения растяжения и глубина их распространения.

Затупление инструмента, обрабатывающего малопластичные материалы, приводит к увеличению сжимающих остаточных напряжений и глубины их проникновения в поверхностный слой.

Процесс шлифования протекает при необычно больших напряжениях, возникающих в тонком слое металла и стружке, снимаемой при обработке с высокой скоростью резания (в десятки раз превосходящей скорость резания металлическим и твердосплавным инструментом), и при высокой температуре в зоне резания, которая иногда приближается к температуре плавления обрабатываемого металла.

В этих условиях каждая из указанных ранее причин возникновения остаточных напряжений поверхностного слоя может преобладать над другими, и тогда характер распределения, знак и величина остаточных напряжений поверхностного слоя после шлифования будут в основном зависеть от этой величины.

Изменение условий шлифования, влекущее за собой повышение температуры металла поверхностного слоя (ухудшение охлаждения, уменьшение теплопроводности обрабатываемого материала, увеличение частоты вращения круга, затупление, засаливание круга, повышение его твердости, увеличение глубины шлифования и подачи, снижение скорости вращения изделия), приводит к росту остаточных напряжений растяжения или

снижению остаточных напряжений сжатия. И наоборот, снижение нагревания зоны шлифования и усиление силового воздействия абразивных зерен, вызывающее пластическую деформацию металла поверхностного слоя (увеличение глубины и подачи шлифования при хорошем отводе теплоты, использование мягких кругов и алмазных кругов с хорошим теплоотводом, рост частоты вращения изделия и снижение скорости вращения круга, применение выхаживания), способствуют уменьшению тепловых растягивающих и увеличению сжимающих остаточных напряжений.

При шлифовании металлов, склонных к фазовым превращениям, повышение нагрева шлифуемого изделия может привести к структурным изменениям, обуславливающим появление остаточных напряжений различного знака и в большинстве случаев снижающим эксплуатационные свойства металла поверхностного слоя.

Почти все доводочные процессы осуществляются при сравнительно низких скоростях и незначительных давлениях, поэтому нагревание металла поверхностного слоя невелико и не может явиться причиной возникновения тепловых остаточных напряжений.

Вместе с тем при всех доводочных процессах происходят пластическая деформация и наклеп металла поверхностного слоя, которые особенно велики при переводе доводки из режима микрорезания в режим трения – полирования. В соответствии с этим при доводке в тонком поверхностном слое обычно возникают остаточные напряжения сжатия, соизмеримые по своей величине с напряжениями, появляющимися при других видах механической обработки.

При суперфинишировании закаленной стали 45 сжимающие остаточные напряжения достигают 844 МПа и распространяются на глубине 0,005 - 0,015 мм. При этом перевод процесса суперфиниширования из режима микрорезания в режим полирования увеличивает остаточные напряжения сжатия с 234 до 844 МПа, т.е. более чем втрое.

Пластические деформации металла поверхностного слоя при хонинговании стали также вызывают сжимающие остаточные напряжения, величина и глубина распространения которых близка по своим значениям к остаточным напряжениям при суперфинишировании /2/.

Остаточные напряжения поверхностного слоя деталей машин слабо влияют на износ от трения скольжения. Но износ может изменять остаточные напряжения в поверхностном слое детали. Наличие остаточных сжимающих напряжений в поверхностном слое повышает долговечность деталей, работающих по принципу качения. Это обусловлено тем, что позади катящегося ролика в материале сопряженной детали (шейка вала, кольцо подшипника) возникают напряжения растяжения. Исследования профессора П.И. Ящерицина показывают, что направление волокон материала детали влияет на ее усталостную контактную прочность. Лучше всего, когда направление волокон параллельно (концентрично) поверхности детали. С увеличением угла выхода волокон к поверхности усталостная контактная прочность снижается.

Напряженное состояние всего сечения детали (например, растягивающие внутренние напряжения в стенках втулки, напрессованной на другую деталь,

растягивающие внутренние напряжения в упруговогнутой пластинке) может оказать свое воздействие на характер и интенсивность износа. Усталостная прочность деталей очень сильно зависит от величины, знака и глубины распространения остаточных напряжений поверхностного слоя. Многочисленные исследования в этой области позволяют сделать вывод, что наличие в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия повышает предел выносливости детали, а наличие остаточных напряжений растяжения – снижает, причем остаточные напряжения сжатия в большей мере повышают предел выносливости, чем снижают его такие же по величине остаточные напряжения растяжения. Для сталей повышенной твердости повышение предела усталости благодаря действию сжимающих напряжений достигает 50 %, а снижение его под действием растягивающих – 30%.

Влияние остаточных напряжений на предел выносливости стали особенно велико, когда разница в прочности стали при растяжении и сжатии большая. В связи с этим предел выносливости твердых сталей зависит от величины и знака остаточных напряжений особенно сильно, в то время как у мягких и пластичных сталей эта зависимость проявляется в меньшей степени/2/.

#### **Литература:**

1. Корсаков В.С. Основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 1974. – 335с.
2. Маталин А.А. Технология машиностроения. – М.: Машиностроение, 1985. – 512с.