

2.2. ENSURING A UNIFORM DISTRIBUTION OF THE ALLOWANCE ON THE FLANKS OF THE TEETH DURING GEAR GRINDING OPERATIONS

На операцию зубошлифования часто зубчатые колеса поступают 10–11 степени точности. Например, после операций зубофрезерования, цементации, закалки и восстановления баз, степень точности по параметру радиального биения изменяется соответственно 9, 10, 11, а погрешность направления зуба изменяется в пределах 10–12 степени точности. На операцию зубошлифования возлагается несвойственная задача: требуется исправить все погрешности от предшествующих технологических операций. Для компенсации возникающих погрешностей требуется в ряде случаев с отдельных боковых поверхностей зубьев шестерни на операции зубошлифования удалять припуск, колеблющийся от 300 до 500 мкм. Кроме того, деформация зубчатого венца колеса вызывает неравномерное распределение припуска и не предсказуемые колебания глубин резания с боковых поверхностей зубьев¹².

Стабилизацию качественных показателей обрабатываемых деталей можно осуществить только при условии оптимального управления средствами технологического оснащения при решении с единых методологических позиций конструкторских, технологических, экономических и организационных задач. Для решения технологических задач необходимо иметь технологический объект (средства технического оснащения), исходное задание (информационную модель или чертеж детали, программу выпуска, технические условия), ограничения и основную цель (срок выпуска, производительность, качество поверхностного слоя и минимальные затраты). Технологический процесс должен обеспечить выполнение всех требований по точности и качеству изделия, предусмотренных чертежом и техническими условиями при минимальной себестоимости в требуемом количестве и в установленные программой сроки. В процессе изготовления зубчатых колес при обработке отверстия в качестве установочной базы используется окружность выступов зубчатого венца¹³.

После фрезерования зубьев, химико-термической обработки, восстановления комплекта установочных баз, контролировались длина общей нормали, радиальное биение зубчатого венца F_{rr} , относительная погрешность окружных шагов и погрешность направления зуба $F_{\beta r}$. По результатам измерений вычислялись: колебание длины общей нормали, наибольшая разность соседних шагов, колебание погрешности направления зуба $V_{F_{\beta r}}$, предельное отклонение шага и накопленная погрешность шага. В качестве основных статистических характеристик выборочных распределений были взяты среднеарифметические значения, среднеквадратическое отклонение σ и поле рассеяния размеров 6σ .

Характеристики выборочных распределений показателей точности зубчатого венца представлены в табл. 1.

Из анализа данных, приведенных в табл. 1. видно, что после зубофрезерования точность колес по параметрам F_{pr} , f_{ptr} и F_{rr} , находится в пределах 7–9 степеней точности, а по параметру $F_{\beta r}$ в пределах 10 степени. После цементации точность колес по параметрам F_{pr} , f_{ptr} и F_{rr} остается в пределах той же степени точности, что и при зубофрезеровании, а по погрешности направления зуба снижается до 11-ой степени, а после восстановления баз снижается до 12-ой. После закалки точность колес по указанным

¹² Bianco/G. And Radzevich,S/P/ Precision Gear Shaving/-Nev York/ Nova Science Publishers/ 2010/- 321 pages.

¹³ Radzevich,S/P/ Dudley's Handbook of Practical Gear Design and Manufacture/ 2 nd Edition, CRC Press, Boca Raton, Flonda, 2011, 1111 pages.

параметрам точности остается практически неизменной. После восстановления баз по исследованным параметрам ($F_{\beta r}, F_{rr}, F_{pr}$) точность снижается на одну степень, а по параметру f_{ptr} снижается на две степени.

Таблица 1. Характеристики выборочных распределений показателей точности зубчатого венца

Показатели точности зубчатого венца	Этапы Обработки	Среднее значение $\bar{x} \pm \Delta\bar{x}$ мкм	σ мкм	6σ мкм	Степень точности по ГОСТ 1643-72
Радиально биение F_{rr}	Зубофрезерование	42,7±6,3	14,9	89,4	9
	цементация	44,6±7,96265,	18,7	112,2	10
	закалка	3±6,8	16,0	96,0	10
	восстановление баз	75,8±9,8	23,9	143,4	11
Накопления погрешность шага F_{pr}	Зубофрезерование	56,8±8,3	19,8	118,8	9
	цементация	51,1±10,6	25,8	154,8	9
	закалка	71,4±9,2	22,3	133,8	9
	восстановление баз	95,3±14,3	35,2	211,2	10
Погрешность направления зуба $F_{\beta r}$	Зубофрезерование	29,5±3,9	8,2	49,2	10
	цементация	55,7±5,8	13,6	81,6	11
	закалка	67,3±8,2	19,8	118,8	11
	восстановление баз	79,3±15,0	36,2	217,2	12
Предельное отклонение шага f_{ptr}	Зубофрезерование	10,8±2,4	3,5	21,0	7
	цементация	10,3±2,2	2,4	14,4	7
	закалка	15,9±2,4	3,5	21,0	7
	восстановление баз	17,3±2,8	4,6	27,6	9

После химико-термической обработки на поверхности зубьев образуются дефекты в виде обезуглероженного слоя и наличия цементитной сетки. Глубина этого дефектного слоя достигает 0,05–0,08 мм. На операции зубошлифования этот дефектный слой желательно удалить. В противном случае указанные дефекты проявят себя с отрицательной стороны в процессе эксплуатации. Припуск на операцию зубошлифования должен компенсировать толщину дефектного слоя Z_a , неточности предшествующей обработки Z_c и погрешности, связанные с наладкой станка Z_b . Толщина дефектного слоя Z_a включает высоту шероховатостей от предшествующей обработки, окалину и обезуглероженный слой от химико-термической обработки. Слой металла, компенсирующий погрешности от предшествующих операций Z_c , включает погрешность профиля f_{fr} , накопленную погрешность окружного шага F_{pr} , погрешность направления зуба $F_{\beta r}$.

$$Z_c = f_{fr} + F_{pr} + F_{\beta r}. \quad (1)$$

Указанные параметры регламентированы ГОСТ 1643–72. Однако с введением химико-термического упрочнения, назначение оптимальных величин припусков усложняется. Высокотемпературные нагревы, резкие охлаждения, структурные превращения металла вызывают появление дополнительных погрешностей, возникающих в результате деформации зубчатого венца. Тепловые и структурные напряжения изменяют диаметральные и осевые размеры колеса, толщину зубьев, искажают плоскостность зубчатого торца. Причем величина этих искажений зависит от конструкции зубчатого колеса. На операции восстановления баз часто не удается повысить точность взаимного расположения основной конструкторской базы и зубчатого венца, поэтому часто на операцию зубошлифования поступают зубчатые колеса, имеющие 9–11 степеней точности (см. табл.1). Для компенсации указанных погрешностей технологи вынуждены увеличивать припуски, полагая, что операция зубошлифования обеспечит необходимую точность. На операцию зубошлифования в этом случае возлагают, кроме основной ее функции (повышение точности), несвойственную ей функцию – удаление увеличенного припуска. В результате, помимо возрастающих затрат времени на обработку, снижаются качество поверхности и эксплуатационные характеристики передач¹⁴. На рис. 1. представлены кривые распределения остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя в зубьях одного и того же колеса из стали 12Х2Н4А (HRC=64 ÷ 65) после операции зубошлифования. На одном из зубьев (кривая 3) обнаружены сжимающие напряжения (20 кгс/мм²), в других (кривые 2, 4, 6) – растягивающие, но разной величины (20–60 кгс/мм²). На секторе, состоящем из трех зубьев, в том числе на зубе 6, обнаружены прижоги и шлифовочные трещины, расположенные перпендикулярно траектории движения круга. Различная напряженность поверхностных слоев зубьев на одном и том же колесе объясняется неравномерностью снимаемого припуска с боковых поверхностей зубьев из-за имеющихся отклонений в шаге и наличия кинематических погрешностей и радиального биения.

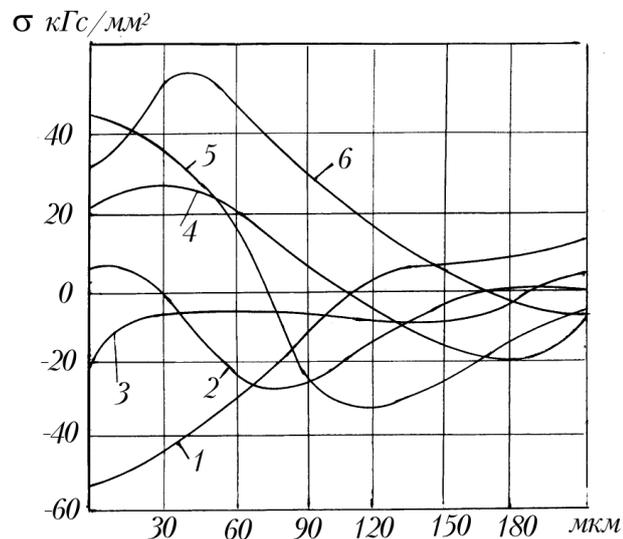


Рис. 1. Кривые распределения остаточных напряжений в поверхностных слоях зубьев после зубошлифования

Эти погрешности формируются, как видно из табл. 1., на протяжении всего технологического процесса до операции зубошлифования. Для разработки рекомендаций по стабилизации качественных показателей зубчатых колес необходимо выяснить причины,

¹⁴ Технология машиностроения: Учебник. / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, П.А. Линчевский, В.П. Ларшин, Е.В. Грисенко, А.А. Якимов, А.В. Фадеев, Г.В. Новиков. – Одесса: ОНПУ, 2012. – 693 с.

вызывающие различную напряженность в зубьях шестерен. Для решения поставленной задачи проанализируем процесс шлифования зубчатого колеса, имеющего радиальное биение $F_{rr} = 140$ мкм и колебание длины общей нормали $V_{wr} = 124$ мкм.

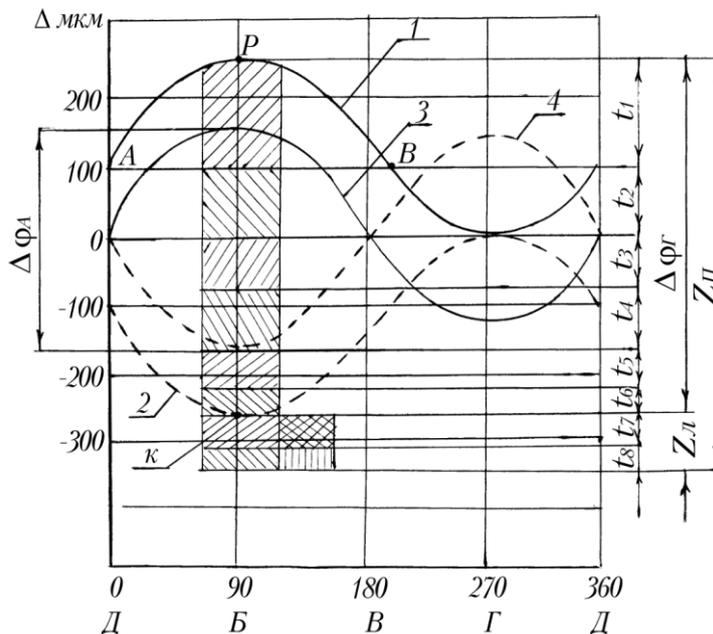


Рис. 2. Распределение припуска на боковых поверхностях зубьев на операции зубошлифования

Настройка по впадине (Г) заключается в том, что шлифовальный круг во впадине (Г) вводится в соприкосновение с правой и левой боковыми поверхностями зубьев. В этом положении зубчатое колесо закрепляется на оправке. Обработка зубьев начинается с максимально бьющего зуба (позиция Р). Контурная (кривая 1) рис.2. показывает характер изменения суммарной радиальной погрешности правых эвольвентных профилей зубьев колеса, а штриховая (кривая 2) показывает изменение суммарной радиальной погрешности левых эвольвентных профилей зубьев. Чтобы устранить черновины на всех зубьях шестерни при данной настройке станка, необходимо с боковой поверхности зуба Р удалить припуск $\Delta\phi_{\Gamma} = 500$ мкм. При удалении общего припуска $\Delta\phi_{\Gamma}$ глубины резания t_1, t_2, t_3, \dots назначаются из условий бездефектной обработки. Шлифование производят с такими режимами, чтобы глубины дефектных слоев, возникающих в поверхностном слое зуба, расположенного в позиции Р, при шлифовании на очередном проходе не превышали припуск, оставшийся под последующие проходы. Заштрихованными зонами на рис. 2 показаны глубины слоев, срезаемых за каждый проход. Следует обратить внимание, что на первом и втором проходах припуск удаляется только с правых боковых поверхностей зубьев. Причем на различных зубьях глубины изменяются от нуля (точка Г при повороте колеса на 270°) до максимума (зуб Р при повороте колеса на 90°)

$$\Delta_{\max} = t_1 + t_2 = 150 + 100 = 250 \text{ мкм} \quad (2)$$

В точке Г (угол 270°) произойдет касание правого и левого профилей зубьев с кругом. На последующих проходах (3, 4, 5, 6) припуск будет удаляться со всех правых и частично с левых боковых поверхностей зубьев. Причем со всех правых боковых поверхностей зубьев будут удаляться одинаковые припуски (t_3, t_4, t_5, t_6). В точке К будет удален с боковой поверхности правого профиля суммарный слой, равный

$$\Delta\phi_{\max} \cos 20^\circ = 500 \cdot 0,9397 = 469,85 \text{ мкм}, \quad (3)$$

а с боковой поверхности левого профиля зуба K произойдет только касание круга. В этой точке K будут полностью устранены черновины на всех боковых поверхностях зубьев колеса. Однако в данном положении, когда будут устранены черновины и зубчатое колесо достигнет требуемой точности, еще нельзя считать обработку законченной. После химико-термической обработки в поверхностном слое зубьев образуются дефекты в виде обезуглероженного слоя или цементитной сетки. Этот дефектный слой должен быть удален.

Следует заметить, что за 6 проходов данный дефектный слой удаляется почти со всех зубьев колеса за исключением нескольких 3–4 зубьев, находящихся вблизи точки K . Для удаления дефектного слоя с левых боковых поверхностей этих 3–4 зубьев следует предусмотреть два дополнительных прохода с глубинами резания $t_7 = 0,04$ мм, $t_8 = 0,02$ мм. После завершения процесса зубошлифования в районе точки P с правых боковых поверхностей зубьев колеса будет удален общий припуск $Z_n = 560$ мкм, а с левых боковых поверхностей зубьев – $Z_n = 60$ мкм. После цементации глубина цементированного слоя на боковых поверхностях зубьев колеблется в пределах 1,0–1,2 мм. После удаления припуска с боковой поверхности зуба $Z_{\text{л}} = 0,560$ мм глубина оставшегося цементированного слоя уменьшается до 0,44–0,64 мм. Следовательно, при рассмотренной схеме настройки зубошлифовального станка по впадине Γ припуски, удаляемые с различных зубьев колеса, будут изменяться в широких пределах. Исходная твердость боковых поверхностей зубьев изменяется от 55 до 65 HRC, процентное содержание углерода изменяется от 1,1% до 0,7%.

Следует заметить, что на некоторых зубьях, находящихся в секторе AB (рис.2), после первого прохода были обнаружены трещины. Для объяснения причин, вызывающих появление шлифовочных трещин на боковых поверхностях зубьев шестерни, рассмотрим зависимость критических точек структурных превращений от содержания углерода в материале цементированного слоя.

С увеличением процентного содержания углерода критическая точка $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения (Mn) смещается в область более низких температур. Например, с увеличением содержания углерода в стали от 0,4% до 1,2% критическая точка $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения уменьшается от 350°C до 150°C. Приведенный анализ показывает, что при удалении с боковых поверхностей зубьев припуска в материале происходят сложные термодинамические процессы, протекающие в условиях многократного наложения температурных полей и изменяющихся физико-механических и химических свойств обрабатываемого материала. Для стабилизации качественных показателей зубчатых колес надо устранить или хотя бы уменьшить колебание глубины снимаемого припуска на операции зубошлифования. Для решения этой задачи надо уменьшить деформацию заготовки при термической обработке, устранить или хотя бы уменьшить погрешность, возникающую при восстановлении баз и, наконец, найти способ оптимальной наладки станка, т. е. по мере возможности распределить более равномерно снимаемый припуск на операции зубошлифования. Закалка в штампах уменьшает деформацию зубчатого венца. Уменьшить погрешность при восстановлении баз можно путем правильного выбора установочных баз. Например, шлифование отверстия, которое служит установочной базой на операции зубошлифования, следует производить не от наружного диаметра, а от диаметра делительной окружности, устанавливая зубчатое колесо с помощью роликов по боковым поверхностям зубьев. И, наконец, следует равномерно распределить припуск на операции зубошлифования, т. е. – оптимизировать наладку. Иными словами, надо найти такую впадину для ориентации зубчатого колеса относительно инструмента, которая сведет к минимуму колебание припусков на операции зубошлифования. В рассматриваемом варианте (рис. 2) на операции зубошлифования ориентация круга по впадине D является наиболее оптимальной. Чтобы обеспечить касание боковых поверхностей зубьев с инструментом во

впадине D , надо обеспечить касание правой и левой боковых поверхностей зубьев в этой точке. Для этой цели следует кривую 1 опустить вниз, совместив ее с точкой 0, а кривую 2 поднять вверх. При наладке стенка по впадине D по сравнению с наладкой по впадине (Γ) максимальный припуск уменьшается с $\Delta = 500$ мкм до $\Delta = 300$ мкм.

На рис. 3. приведены кривые изменения припуска на боковых поверхностях зубьев: по левым профилям (контурные линии) и по правым профилям (штриховые линии). Если перед началом процесса зубошлифования выбрать при настройке станка любую из впадин зубчатого колеса, например, впадину « D » (рис. 3) и в эту впадину ввести шлифовальный круг до касания с боковыми поверхностями зубьев, закрепив при этом зубчатое колесо на оправке и с этого положения проводить шлифование, то нетрудно заметить, что припуск будет удаляться только с левого профиля боковой поверхности зуба (контурная линия). Причем, при повороте зубчатого колеса на 180° от точки D до точки B величина снимаемого припуска будет возрастать и в точке B она достигнет максимальной величины 250 мкм. Между правой боковой поверхностью зуба и шлифовальным кругом (пунктирная линия 4) будет зазор, который в указанном интервале поворота колеса от точки D до точки B будет равен 230 мкм.

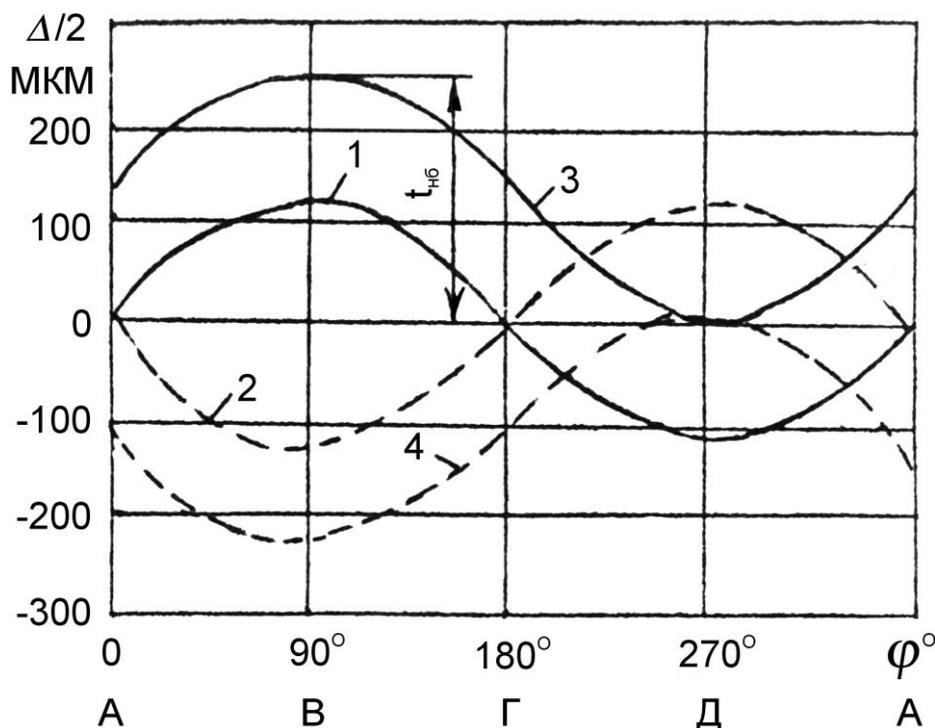


Рис. 3. Кривые суммарных погрешностей зубьев по левым (контурные линии) и правым (штриховые линии) боковым поверхностям при настройке кругов по впадине А (кривые 1 и 2) и впадине Д (кривые 3, 4)

Для устранения черновин необходимо с левого профиля боковых поверхностей зубьев, расположенных в зоне В (рис.3) удалить припуск $\Delta=480$ мкм. В этом случае с боковой поверхностью правого профиля зубьев, расположенных в зоне В произойдет только касание круга. Ориентация зубчатого колеса по отношению к шлифовальному кругу по впадине Γ (рис. 3) обеспечивает выравнивание припуска по правым и левым боковым поверхностям зубьев шестерни. Проведенный анализ показывает, что первоначальная ориентация зубчатого колеса относительно режущего инструмента оказывает исключительно большое влияние на неравномерность распределения припуска на боковых поверхностях зубьев.

Базирование зубчатых колес связано с их конструктивным оформлением, служебным назначением и точностью зубчатого колеса. На первых операциях обрабатываются те поверхности, которые в дальнейшем будут использованы в качестве установочных баз.

Например, при изготовлении зубчатых колес (вал шестерни) на первой операции обрабатываются торцы и центровые отверстия, которые в дальнейшем используются в качестве установочной базы почти на всех последующих операциях.

При изготовлении зубчатых колес, которые имеют малую ширину зубчатого венца и большую площадь торцевой поверхности, на первой операции обрабатывается торец и отверстие, которые в дальнейшем будут использованы в качестве технологической базы.

При изготовлении зубчатых колес, имеющих ступицу, на первой операции обрабатывается отверстие, выполняющее роль двойной направляющей базы и базовый торец (опорную базу).

Маршрут изготовления зубчатых колес 4–6-й степеней точности заканчивается шлифованием зубьев колеса, а маршрут изготовления зубчатых колес 7–8-й степени точности – шевингованием до термической обработки и калибровкой отверстия после термической обработки.

Технологический маршрут изготовления зубчатых колес 4–5-й степени точности:

1. Заготовка штамповка.

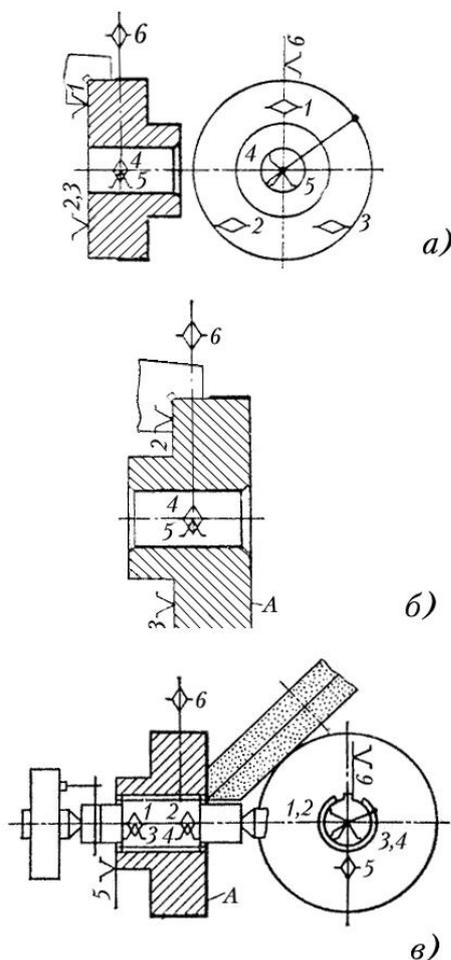


Рис. 4. Операционные эскизы

2. Предварительная токарная обработка (рис. 4, а).
3. Предварительная обработка базового торца А, наружного диаметра и отверстия (рис. 4, б).
4. Контроль.
5. Термическая обработка, нормализация и отпуск.
6. Полуцистловая токарная обработка с одной стороны (по аналогии с операцией №2).

7. То же с другой стороны (по аналогии с операцией №3).
8. Протягивание шлицевого отверстия.
9. Зачистка заусенцев.
10. Предварительное шлифование базового торца А и наружного диаметра (рис. 4, в).
11. Предварительное шлифование отверстия шлицев и торца.
12. зубонарезание.
13. зубозакругление.
14. Термическая обработка, цементация, закалка, отпуск, обработка холодом.
15. Притирка шлицев чугуном притиром.
16. Окончательное шлифование базового торца А цилиндрической поверхности на центровой оправке с конусом 1:1000 биения не более 0,003–0,005 мм.
17. Окончательное шлифование отверстия и торца зубчатого колеса с установкой в четырехкулачковый патрон с выверкой по наружному диаметру с точностью 0,005 мм.
18. Шлифование зубчатого венца на зубошлифовальном станке класса А(5851, 5833, 5831).
19. Мойка.
20. Контроль параметров зубчатого колеса.

На рис. 5. показаны эскизы обработки и способы базирования плоского зубчатого колеса на операциях:

1. Предварительная (черновая) токарная обработка с двух сторон (рис. 5, а) на вертикально-токарном полуавтомате;
2. Чистовое растачивание отверстия по 7-му качеству точности при установке с поджимом к торцу с помощью скошенных кулачков на алмазно-расточном станке (рис. 5, б);
3. Чистовое обтачивание по венцам на круглой оправке с базированием по малому диаметру шлицев (рис.5, в).

При изготовлении зубчатых колес контроль параметров точности осуществляется в два этапа: до зубообработки и на участке зубообработки.

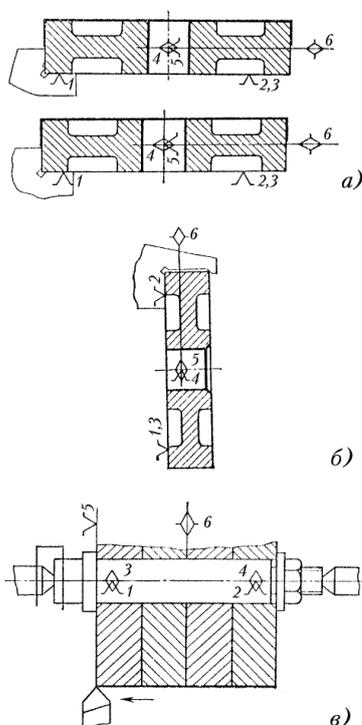


Рис. 5. Операционные эскизы

Важным параметром точности является обеспечение совпадения оси шлицевого отверстия с осью делительной окружности колеса. Кроме того при обработке требуется обеспечить точность параметров, от которых зависит работоспособность зубчатой передачи.

К числу основных показателей точности зубчатых колес относят:

- радиальное биение F_{rr} ;
- колебание длины общей нормали V_{wr} ;
- накопленная погрешность шага F_{pr} ;
- погрешность профиля f_{fr} ;
- погрешность направления зуба $F_{\beta r}$.

Перечисленные параметры точности после операций зубофрезерования, цементации, закалки и восстановления установочной базы изменяются в широких пределах. Например, из опыта изготовления зубчатых колес, известно, что радиальное биение F_{rr} изменяется от 33 до 116 мкм; колебание длины общей нормали изменяется от 20 до 55 мкм; накопленная погрешность шага F_{pr} изменяется от 37 до 163 мкм; погрешность направления зуба изменяется от 28 до 146 мкм.

После химико-термической обработки на поверхности зубьев образуется дефектный слой в виде обезуглероженного слоя и наличия цементитной сетки. Глубина этого дефектного слоя достигает 0,05–0,08 мм. На операции зубошлифования этот дефектный слой необходимо удалить. В противном случае указанный дефект проявит себя с отрицательной стороны в процессе эксплуатации.

Припуск на операцию зубошлифования должен компенсировать: толщину дефектного слоя Z_a ; неточность предшествующей обработки $Z_c = f_{fr} + F_{pr} + F_{\beta r}$; погрешность, связанную с наладкой станка Z_b .

На рис. 6. представлены кривые распределения припуска по правым и левым профилям зубьев (контурные линии). За полный оборот зубчатого колеса, при данной настройке станка, обрабатываться будут только правые боковые поверхности зубьев. Между кругом и левыми боковыми поверхностями зубьев будет зазор.

При такой схеме настройки зубошлифовального станка общий припуск будет колебаться от 260 до 300 мкм. С увеличением припуска на обработку увеличивается требуемое количество проходов и возрастает время на обработку.

Следовательно, перед операцией зубошлифования надо по разработанной методике произвести выравнивание припуска по боковым поверхностям зубьев.

На рис. 6. пунктирными линиями показаны кривые распределения припуска по правым и левым профилям зубьев после выравнивания припусков.

После выравнивания общий припуск на обработку сократится до 110 мкм.

Оптимальный цикл зубошлифования надо строить таким образом, чтобы интенсивность съема материала уменьшалась к концу цикла. Для устранения шлифовочных дефектов необходимо удаление припуска производить с таким расчетом, чтобы дефектный слой от предыдущего прохода не превышал оставшийся припуск на последующую обработку.

Наладка зубошлифовального станка должна обеспечить выравнивание припуска. На рис. 7. (кривые 1, 2) представлено выравнивание припуска по боковым поверхностям зубьев. Следовательно, перед операцией зубошлифования необходимо произвести наладку зубошлифовального станка с целью обеспечения более равномерного распределения припуска.

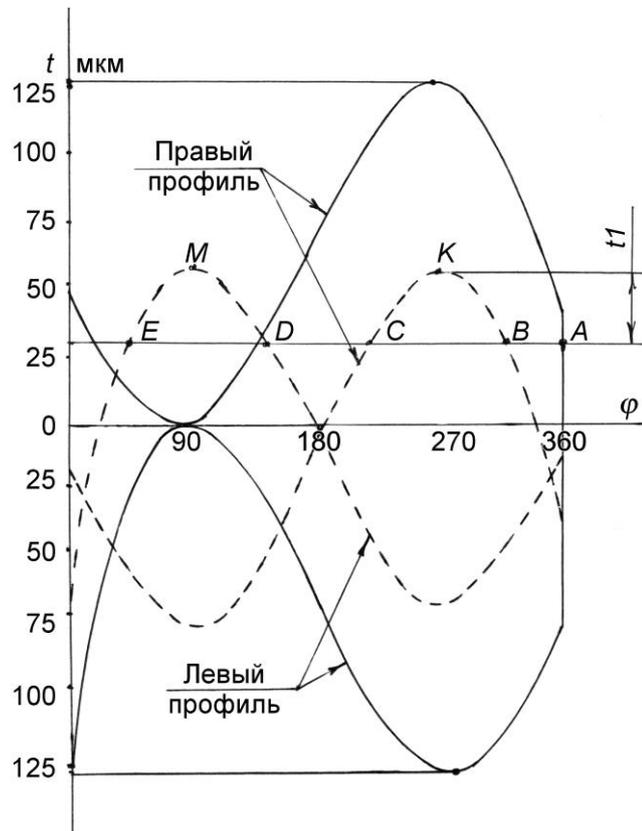


Рис. 6. Кривые распределения припуска

Наладку станков при выравнивании припуска рекомендуется производить в следующей последовательности:

1. Вне станка на оправке определяется впадина, находящаяся на минимальном расстоянии от центра вращения зубчатого колеса.

2. Оправка с зубчатым колесом устанавливается в центрах зубошлифовального станка и шлифовальный круг подводится до касания с боковыми поверхностями зубьев минимально удаленной впадины от центра вращения заготовки (рис.7). По нониусу станка регистрируется первоначальное положение круга.

3. Шлифовальный круг отводится от зубчатого колеса, а последнее поворачивается вокруг своей оси на 90° с помощью делительного механизма. После этого шлифовальный круг вводится во впадину до касания с боковыми поверхностями зубьев зубчатого колеса. При этом из-за наличия на зубчатом колесе погрешностей, шлифовальный круг коснется только одной из сторон (правой или левой) впадины, а между другой стороной впадины и кругом будет зазор δ_1 (рис.7). По нониусу станка регистрируется положение круга. Вычисляется величина смещения оси шлифовального круга по отношению к ее первоначальному (настроечному) положению δ_1'' .

4. Шлифовальный круг отводится от зубчатого колеса, а последнее поворачивается вокруг своей оси на угол 180° с помощью делительного механизма. После этого шлифовальный круг снова вводится до касания с впадиной зубчатого колеса. При этом из-за наличия на зубчатом колесе погрешностей шлифовальный круг касается только одной из сторон впадины, а между ее другой стороной и кругом будет зазор δ_2 . По нониусу станка регистрируется положение круга. Вычисляется величина смещения оси шлифовального круга δ_2'' по отношению к ее первоначальному (настроечному) положению.

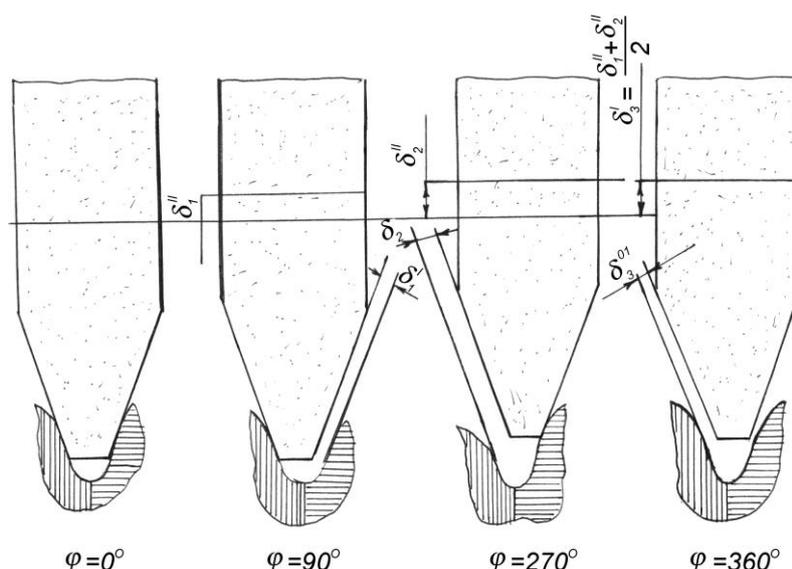


Рис. 7. Последовательность наладки зубошлифовального станка, обеспечивающая равномерности распределения припуска

5. Шлифовальный круг подводится до касания с боковыми поверхностями впадины, минимально удаленной от центра вращения зубчатого колеса. Затем шлифовальный круг отводится от зубчатого колеса на величину $\delta'_3 = \frac{\delta''_1 + \delta''_2}{2}$. После этого между шлифовальным кругом и боковыми поверхностями зубьев образуются одинаковые зазоры δ''_3 .

Выводы. После настройки шлифовального круга по вышеприведенному алгоритму осуществляется первый проход. Последующие проходы шлифования осуществляются с уменьшающимися от прохода к проходу глубинами. Глубина дефектного слоя, возникающего при шлифовании, не должна превышать величину припуска, оставшегося на последующие проходы.

Чтобы обеспечить максимальную производительность зубошлифования, необходимо общий припуск удалять за минимальное количество проходов. С другой стороны, чтобы обеспечить требуемую точность и качество поверхностного слоя необходимо шлифование производить с такими режимами, при которых глубина дефектного слоя не будет превышать величину оставшегося припуска на последующие проходы.

References:

1. Bianco G. and Radzevich, S.P. Precision Gear Shaving/-New York/ Nova Science Publishers/ 2010/- 321 pages.
2. Radzevich, S.P. Dudley's Handbook of Practical Gear Design and Manufacture/ 2nd Edition, CRC Press, Boca Raton, Florida, 2011, 1111 pages.
3. Технология машиностроения: Учебник. / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, П.А. Линчевский, В.П. Ларшин, Е.В. Грисенко, А.А. Якимов, А.В. Фадеев, Г.В. Новиков. – Одесса: ОНПУ, 2012. – 693 с.