

УДК 621.91

DOI: 10.12737/article\_592d14ddcb2a19.76456116

В.В. Клепиков, д.т.н.,

А.А. Черепакхин, к.т.н.

(Московский политехнический университет,  
105023, Москва, ул. Б. Семеновская, д. 38)

E-mail: tkm1410@yandex.ru; prof\_klepikov@mail.ru

## Особенности облегающего шевингования цилиндрических зубчатых колес

Предложена методика определения геометрических параметров охватывающего шевра на основе расчета скоростей относительного движения инструмента и заготовки. На основе теории расчета направлений векторов относительной скорости на шевре разработаны конструкции шевров с наклонными и прямыми стружечными канавками. Рассмотрены варианты расположения стружечных канавок для различных условий шевингования.

**Ключевые слова:** охватывающий шевр; стружечная канавка; относительная скорость движения.

V.V. Klepikov, D. Eng.,

A.A. Cherepakhin, Can. Eng.

(Moscow Polytechnic University, 38, B. Semyonovskaya Str., Moscow 105023)

## Peculiarities in easy spur cog-wheel shaving

A procedure for the definition of female shaver geometrics on the basis of the computation for relative motion velocities of a tool and a blank is offered. On the basis of the theory for the vector direction computation of a relative velocity on a shaver there are developed designs of shavers with sloping and upright chip grooves. Options for chip groove locations for different conditions of shaving are considered.

**Keywords:** female shaver; chip groove; relative velocity of motion.

Зацепление классического шевра с обрабатываемым венцом имеет точечный контакт, что требует перемещения точки скрещивания осей шевра и обрабатываемого колеса вдоль зубчатого венца. Для исключения этого перемещения, а, следовательно, упрощения кинематической схемы станка с одновременным повышением жесткости упругой технологической системы необходим линейный характер контакта [1, 2]. Шевр с линейным контактом получил название «Облегающий шевр» (рис. 1).

Достоинством обработки зубчатых венцов облегающим шевром является уменьшение машинного времени и отсутствие дополнительного движения продольной подачи [3]. При этом возможно получение бочкообразной формы зуба, как и при классическом шевинговании.

При внедрении облегающего шевингования основным сдерживающим фактором является

трудность профилирования зуба шевра, так как боковая поверхность зуба облегающего шевра не является эвольвентной, а сам зуб имеет ярко выраженную седлообразность  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$  [4].

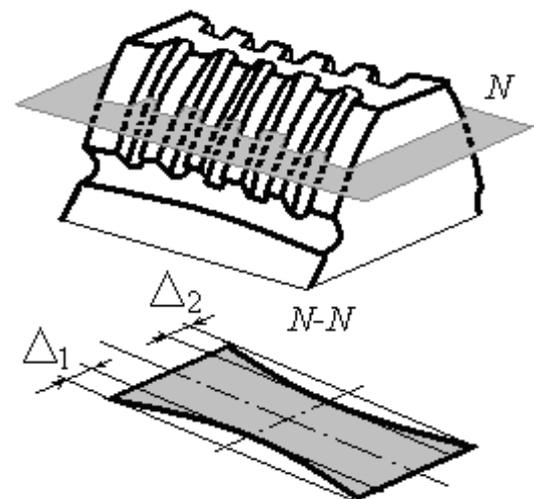


Рис. 1. Сечение зуба облегающего шевра

Определение геометрических параметров шевров является достаточно сложной задачей, определяемой на основе математических модулей станочного зацепления при шевинговании. При этом в целях упрощения расчетов целесообразно использовать имеющиеся данные о скорости относительного движения инструмента и заготовки [5, 6].

Скорость относительного движения при взаимодействии поверхностей зубьев инструмента и колеса представляет собой скорость резания при шевинговании. Обеспечение требуемой точности и качества обработки при шевинговании (в частности высокое качество обрабатываемой поверхности зуба колеса) в значительной мере зависит от величины и направления относительной скорости в зацеплении колесо–инструмент  $V_{к.и}$ . При этом необходимо обеспечить постоянство угла между направлением вектора этой скорости и направлением режущей кромки [5].

Изменение этого угла в процессе обработки приводит к следующим последствиям:

- колебанию шероховатости обработанной поверхности;
- неравномерности толщины срезаемого слоя на равных участках, вызывающей значительные отклонения от расчетной геометрии поверхности зуба колеса;
- неравномерной деформации зубьев обработанного венца за счет колебаний остаточных напряжений и толщины наклепанного слоя.

Таким образом, для правильного выбора геометрии режущих элементов инструмента следует знать соотношение между относительными скоростями и направлениями их векторов в различных точках поверхности зуба (рис. 2, 3, 4).

Вектор скорости относительного движения в контактной точке определяется выражением:

$$\vec{V}_{и.к} = \vec{V}_и + \vec{V}_к, \quad (1)$$

где  $V_{и.к}$  – вектор скорости относительного движения в контактной точке;  $V_и$  – вектор скорости движения в контактной точке инструмента;  $V_к$  – вектор скорости движения в контактной точке колеса (зуба нарезаемого венца).

Проекции скорости относительного движения в системе координат определяются выражениями:

$$\begin{aligned} V_{и.к}^s &= V_{и.к}^{и.х} \cos \alpha_{wi} - V_{и.к}^{и.у} \sin \alpha_{wi} \cdot \cos \beta_{и.и} + \\ &+ V_{и.к}^{и.з} \sin \beta_{и.и} \cdot \sin \alpha_{wi}; \\ V_{и.к}^n &= V_{и.к}^{и.х} \sin \alpha_{wi} - V_{и.к}^{и.у} \cos \beta_{и.и} + \\ &+ V_{и.к}^{и.з} \cdot \sin \beta_{и.и} \cdot \cos \alpha_{wi}; \\ V_{и.к}^\tau &= V_{и.к}^{и.х} \sin \beta_{и.и} + V_{и.к}^{и.з} \cos \beta_{и.и}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $V_{и.к}^\tau$  – продольная скорость относительного движения поверхностей инструмента и колеса;  $V_{и.к}^s$  – продольная скорость относительного движения;  $V_{и.к}^n$  – нормальная скорость относительного движения.

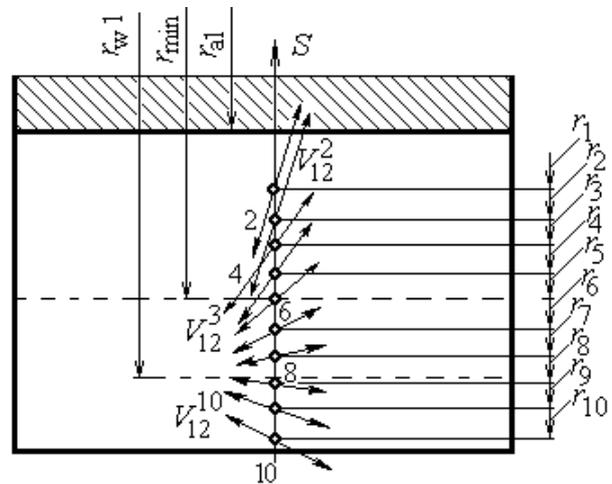


Рис. 2. Распределение векторов относительной скорости ( $V_{1,2}$ ) на шевере

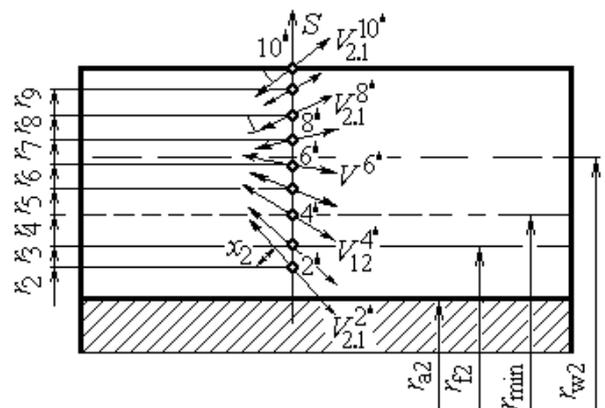


Рис. 3. Распределение векторов относительной скорости ( $V_{2,1}$ ) на обрабатываемом венце

Учитывая отсутствие внедрения зубьев, имеем  $V_{и.к}^n = 0$ . Таким образом, вектор полной скорости относительного движения может быть представлен выражением:

$$V_{и.к.}^n = \sqrt{(V_{\Sigma_{и.к.}}^{\tau})^2 + (V_{и.к.}^s)^2} \quad (3)$$

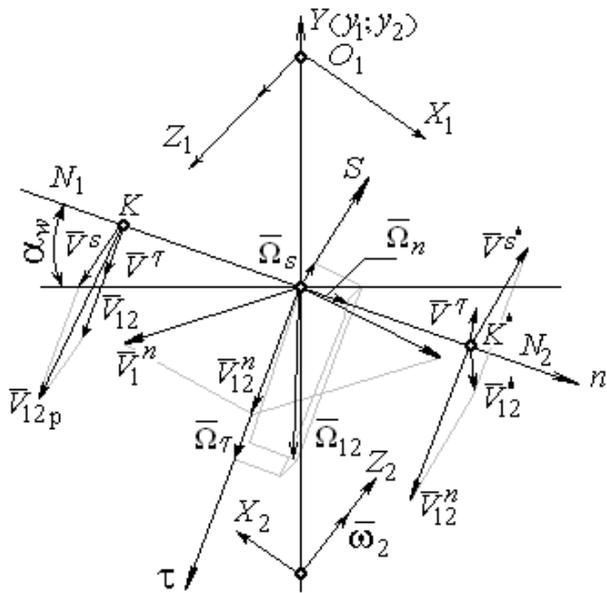


Рис. 4. Распределение скорости относительного движения взаимодействующих поверхностей зубьев шевера и обрабатываемого венца

При анализе принятой схемы обработки необходимо учесть технологические особенности получения главных поверхностей сопрягаемых колёс. Поэтому при теоретическом анализе принятой схемы обработки необходимо учитывать следующие особенности:

- в зацеплении инструмента с обрабатываемым колесом имеет место квазилинейный контакт зубьев;
- главные поверхности зубьев колеса и инструмента образованы в общем случае разными производящими поверхностями;
- в процессе обработки изменяются геометрические параметры схемы зацепления, связанные с непрерывным съемом металла и наличием радиальной и продольной подачи;
- главные поверхности зубьев колеса формируются окончательно как огибающие семейства производящих линий (режущих кромок) при двухпараметрическом взаимоогибании главных поверхностей зубьев инструмента и обрабатываемого колеса.

Приведем значения кинематических параметров станочного зацепления, отнесенных к шевру (табл. 1) и к колесу (табл. 2).

На основе теории расчета направлений векторов относительной скорости на шевре создана новая конструкция шевера с наклонными и прямыми стружечными канавками.

На боковых поверхностях зуба шевера

стружечные канавки расположены веерообразно с различными схемами расположения (рис. 5).

1. Значения кинематических параметров станочного зацепления, отнесенных к шевру

№	$r_u$	$V^s$	$V_{и.к.}^n + V^{\tau}$	$V$	$X$
	мм	мм/с	мм/с	мм/с	град.
1	101,75	-879,3	287,1	925,0	-71,9
2	102,0	2779,4	297,9	834,4	-69,1
3	103,0	-549,7	322,9	637,6	-59,6
4	104,0	-3952	339,7	521,1	-49,3
5	105,0	-269,6	353,4	445,5	-37,3
6	106,0	-160,7	365,2	399,0	-23,8
7	107,0	-62,8	375,9	381,1	-9,5
8	108,0	26,8	385,7	386,6	4,0
9	109,0	110,4	394,8	410,0	15,6
10	110,0	189,1	403,4	445,4	25,1

2. Значения кинематических параметров станочного зацепления, отнесенных к колесу

№	$r_u$	$V^s$	$V_{и.к.}^n + V^{\tau}$	$V$	$X$
	мм	мм/с	мм/с	мм/с	град.
1	77,0	773,6	467,0	903,6	58,9
2	78,0	500,7	437,2	664,7	48,9
3	79,0	345,3	420,3	544,0	39,4
4	80,0	222,8	407,0	464,0	28,7
5	81,0	117,8	395,6	412,0	16,6
6	82,0	24,1	385,4	386,1	3,6
7	83,0	-61,7	376,0	381,0	-9,3
8	84,0	-141,3	367,3	393,6	-21,0
9	85,0	-216,3	359,2	419,3	-31,1

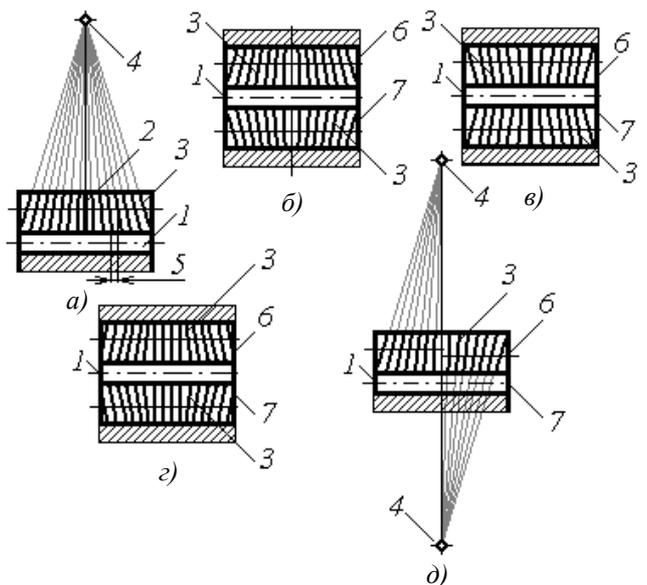


Рис. 5. Шевер с наклонными и прямыми стружечными канавками:

1 – зуб шевера; 2, 3 – прямая и наклонная стружечные канавки; 4 – центр образования веера; 5 – шаг стружечной канавки; 6, 7 – боковые поверхности зуба шевера

На боковой поверхности профиля зуба 1 расположена прямая стружечная канавка 2 и наклонные стружечные канавки 3, выполненные веерообразно. При этом наклонные канавки имеют углы наклона, постепенно увеличивающиеся к краям шевра (рис. 5, а). Центр образования веера 4 лежит на линии, проходящей через прямую стружечную канавку 2. На линии делительного цилиндра стружечные канавки выполнены с постоянным шагом 5. При этом стружечные канавки 3 на боковых сторонах 6 и 7 зуба 1 выполнены веером, расходящимся от головки к ножке зуба на обеих сторонах и наоборот (рис. 5, б).

При необходимости осуществления процесса зубошевингования в пределах одного цикла обработки с реверсом или без реверса на боковых сторонах 6 и 7 зуба 1 стружечные канавки 3 на одной половине боковой поверхности профиля зуба расположены веером, расходящимся от головки к ножке зуба, а на другой поверхности профиля зуба стружечные канавки 3 расположены веером, расходящимся от ножки к головке зуба (рис. 5, в).

Как известно, головка зуба шевра имеет наибольший путь резания, а, следовательно, и максимальный износ.

В схеме выполнения стружечных канавок шевра веерообразно обеспечено постоянство требуемого угла  $90^\circ$  между вектором относительной скорости и направлением режущей кромки стружечной канавки путем аппроксимации наклонной стружечной канавки в области, где наиболее сложные условия резания, а именно на головке зуба шевра. При этом оптимизируется каждая средняя наклонная стружечная канавка в обеих частях зуба, расположенных по обе стороны от прямой канавки.

Различный наклон стружечных канавок в пределах одной стороны зуба шевра позволяет обеспечить благоприятные условия на головке зуба шевра как при резании в одном, так и в другом направлении. Такая схема расположения стружечных канавок позволяет шевинговать зубья зубчатых секторов поворотом шевра на угол, соответствующий обрабатываемому сектору.

Схема расположения стружечных канавок, показанная на рис. 5, г, предназначена для шевингования колес без реверса, так как противоположное расположение вееров стружечных канавок на правой и левой сторонах зуба шевра позволяет обеспечить равные условия резания на ведущих сторонах зубьев колеса.

Для случая обработки зубчатых колес с малым числом зубьев целесообразно применение схемы расположения стружечных канавок (рис. 5, д).

В начальный момент врезания режущих кромок стружечных канавок, например, левой половины веера шевра в боковую поверхность профиля зуба колеса одновременно несколько режущих кромок вступают в работу, перекрывая друг друга, постепенно увеличивая площадь контакта зубьев шевра и колеса в процессе обработки и числа режущих кромок, одновременно участвующих в процессе резания, компенсируют это отрицательное влияние неравных контактных напряжений, вызывающих перекося осей шевра и колеса.

Плавное врезание режущих кромок стружечных канавок значительно уменьшает перекося осей шевра и колеса. При этом обеспечивается повышение качества обработки, так как шевр постепенно входит в зацепление с обрабатываемым колесом. Припуск с таким расположением стружечных канавок снимается равномерно и длина резания каждой режущей кромки короче, чем при расположении стружечных канавок с повторяющимся сочетанием прямых и наклонных канавок. Таким образом, нагрузка на режущие кромки стружечных канавок уменьшается.

В конечный момент зацепления шевра с колесом используется правая половина веера шевра. При этом обеспечивается разгрузка режущих кромок стружечных канавок при выходе шевра из зацепления. Уменьшение нагрузки на режущие кромки при выходе шевра объясняется увеличенной степенью перекрытия режущих кромок в процессе резания. Равномерная нагрузка режущих кромок в процессе резания в зоне начальной окружности обеспечивается постоянством шага стружечных канавок на линии делительного цилиндра. Уменьшение нагрузки на режущие кромки стружечных канавок приводит к уменьшению износа режущих кромок шевра.

## Выводы

Применение облегающего шевингования позволяет:

- уменьшить машинное время обработки;
- повысить жесткость упругой технологической системы за счет исключения дополнительного движения продольной подачи;
- получить бочкообразный зуб, не применяя качательного движения подачи шевра.

Предлагаемая методика расчета соотношений между относительными скоростями и направлениями их векторов в различных точках поверхности зуба позволяет обеспечить постоянство угла между направлением вектора скорости в зацеплении «колесо-инструмент» и направлением режущей кромки, что в свою очередь позволяет выбрать:

- форму контакта зубьев инструмента и заготовки;
- схему расположения стружечных канавок инструмента.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калашников, А.С. Передовые технологии изготовления зубчатых колес // Справочник. Инженерный журнал. – 2012. – № 11. – С. 44 – 51.
2. Клепиков, В.В., Солоницын, Б.М. Повышение технологических возможностей процесса чистовой обработки зубчатых колес // Вестник машиностроения. – 2005. – № 11. – С. 47 – 49.
3. Параметрическая оптимизация обработки зубчатых колес. Монография: Виноградов В.М., Черепакхин А.А., Клепиков В.В./ Deutschland, Saarbrücken, the publishing house LAP Lambert Academic Publishing GmbH &Co., 2012 г. – 230 с.
4. Клепиков, В.В., Черепакхин, А.А. Влияние метода формообразования зубьев на форму припуска под зубоотделочные операции и их точность // Научные технологии в машиностроении. – 2016. – № 3(57). С. 35 – 39.
5. Солоницын, Б.М., Клепиков, В.В. Совершенствование способа зубошвингования цилиндрических колес

облегающими шеверами // Тракторы и сельхозмашины. – 2010. – № 3. – С. 59 – 53.

6. Солоницын, Б.М., Клепиков, В.В. Повышение качества и производительности процесса швингования зубчатых колес // Вестник машиностроения. – 2008. – № 10. – С. 54 – 55 с.

## REFERENCES

1. Kalashnikov, A.S. Efficient technologies in manufacturing cog-wheels // *Reference Book. Engineering Journal.* – 2012. – № 11. – pp. 44 – 51.
2. Klepikov, V.V., Solonitsyn, B.M. Technological potentialities increase in cog-wheel finishing // *Bulletin of Mechanical Engineering.* – 2005. – № 11. – pp. 47 – 49.
3. *Parametric Optimization in Cog-Wheel Machining.* Monograph: Vinogradov V.M., Cherepakhin A.A., Klepikov V.V./ Deutschland, Saarbrücken, the publishing house LAP Lambert Academic Publishing GmbH &Co., 2012 г. – pp. 230.
4. Klepikov, V.V., Cherepakhin, A.A. Impact of teeth shaping method upon allowance form for teeth finishing operations and their accuracy // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering.* – 2016. – № 3(57). pp. 35 – 39.
5. Solonitsyn, B.M., Klyopikov, V.V. Up-dating of method for teeth shaving of spur cog-wheels with female shavers // *Tractors and Agricultural Machinery.* – 2010. – № 3. – pp. 59 – 53.
6. Solonitsyn, B.M., Klepikov, V.V. Quality and efficiency increase in cog-wheel shaving // *Bulletin of Mechanical Engineering.* – 2008. – № 10. – pp. 54 – 55.

Рецензент д.т.н. Г.А. Харламов

УДК 621.941

DOI: 10.12737/article\_592d151f08adf1.59398484

Е.В. Пашков, д.т.н.,  
 А.А. Вожгов, старший преподаватель  
 (ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет,  
 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33)  
 E-mail: 0506773532@mail.ru

## Моделирование процесса двурезцового точения фасонных поверхностей

Приведен анализ технологической схемы двурезцового фасонного точения. Рассмотрена неустойчивая форма колебаний системы «резец–заготовка» в процессе фасонного точения. Представлены зависимости позволяющие оценить величины колебаний при обработке. Приведен ряд экспериментальных исследований, подтверждающих теоретические предположения.

**Ключевые слова:** двурезцовое точение; фасонная поверхность; колебания; качество поверхности; эффективность процесса.