

КОНСТРУКЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КОСОЗУБЫХ ДОЛБЯКОВ И ОБКАТОЧНЫХ РЕЗЦОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Я. БАЛИ

Кафедра Технологии Машиностроения Будапештского Технического Университета

(Поступило: 20 марта 1974 г.)

Представлено проф. д-р. И. КАЛАСИ

Введение

Применение вычислительных машин для расчета, конструирования и технологизации режущих инструментов требует иного подхода к решению инженерных задач.

Метод ручного расчета и конструирования должен быть критически пересмотрен; приближения и допущения, сделанные с целью сокращения объема расчетных работ, должны подвергаться анализу с точки зрения целесообразности их сохранения и при применении метода машинного конструирования; процесс конструирования должен быть рассмотрен совместно с разработкой технологического расчета, включающего в себя расчет вспомогательного инструмента, наладку и настройку станков и т. п.

Для того, чтобы эту комплексную работу перевести на вычислительные машины, необходимо, чтобы в распоряжении инженера-инструментальщика имелись строгие математические зависимости, методика проектирования, поддающаяся легкой и быстрой алгоритмизации.

В данном докладе излагается метод конструктивно-технологического расчета косозубых зуборезных инструментов, который наиболее характерно иллюстрирует, какую доделку должны проводить специалисты перед переходом к методу машинного проектирования.

Под конструктивно-технологическим расчетом зуборезных колес (долбяки, зуботочильные резцы и т. п.) подразумевается совокупность геометрического, технологического и метрологического расчетов.

Данный метод должен обеспечивать следующее:

- инструмент, с точки зрения теории зацепления, должен зацепляться с обрабатываемым зубчатым изделием;
- инструмент, с точки зрения теории резания, должен иметь все углы и поверхности, необходимые для процесса снятия стружки;
- зубчатые элементы инструмента должны быть обработаны на станках, предназначенных для обработки цилиндрических зубчатых колес;

- обработка зубчатых элементов инструмента должна иметь максимальную производительность, без повторных, пробных коррекционных проходов;
- контроль параметров должен быть осуществим на приборах, предназначенных для измерения зубчатых колес.

1. Геометрический расчет зуборезного колеса

Задача геометрического расчета сводится в основном к определению параметров зуборезных реек, зацепляющихся с зуборезным колесом как режущим инструментом и как обрабатываемым изделием при его изготовлении.

Этот метод расчета известен в кругу специалистов, здесь только хотелось указать на некоторые недопустимые приближения, содержащиеся в формулах:

профильный угол в нормальном сечении:

$$\operatorname{tg} \alpha_s = \frac{\operatorname{tg} \alpha_0}{1 - C \operatorname{tg} \gamma_f \operatorname{tg} \delta_f} \quad (1)$$

Обычно коэффициент C инструментальщики принимают равным единице, что ошибочно. C зависит от формы передней поверхности и для косозубых зуборезных колес он может равняться единице только тогда, когда передняя поверхность оформлена по винтовой поверхности, что обычно не делается.

Только для этого случая:

$$\operatorname{tg} \alpha_s = \frac{\operatorname{tg} \alpha_0}{1 - \operatorname{tg} \gamma_f \operatorname{tg} \delta_f} \quad (2)$$

(смотри фиг. 1)

Введение поправочного коэффициента C значительно повышает точность зуборезного колеса особенно при малом числе зубьев и при большом угле наклона и большом значении заднего угла.

Вторая конструктивная особенность косозубых зуборезных колес заключается в асимметричности и несовпадении нормального шага их инструментально-технологической рейки с нормальным шагом конструкционной рейки.

$$t_{nm} = \frac{t_n}{\cos \theta} \quad (3)$$

где

$$\operatorname{tg} \theta = \operatorname{tg} \beta \cdot \sin \delta_f$$

Это положение иллюстрируется на фигуре 2, где верхняя часть относится к конструкционной рейке, нижняя — к технологической.

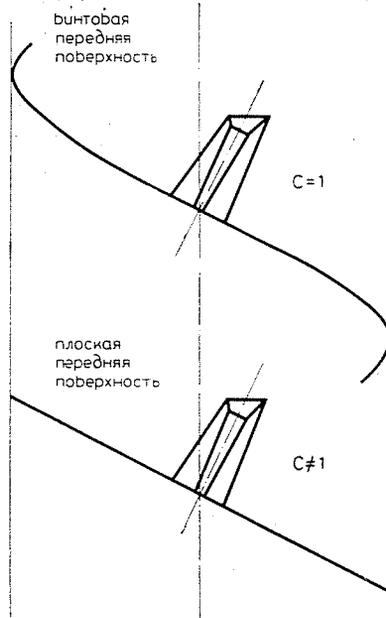


Рис. 1

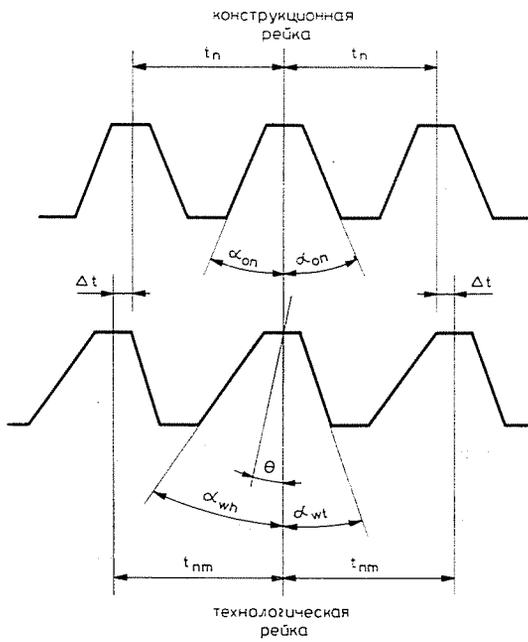


Рис. 2

На фиг. 3 показано расположение технологической рейки относительно базовых плоскостей зуборезного колеса. Плоскость A перпендикулярна к оси зуборезного колеса; TI — плоскость, касательная к наружному конусу; S — плоскость симметрии зуба колеса; K — плоскость зацепления технологической рейки с колесом; N — нормальная плоскость технологической рейки.

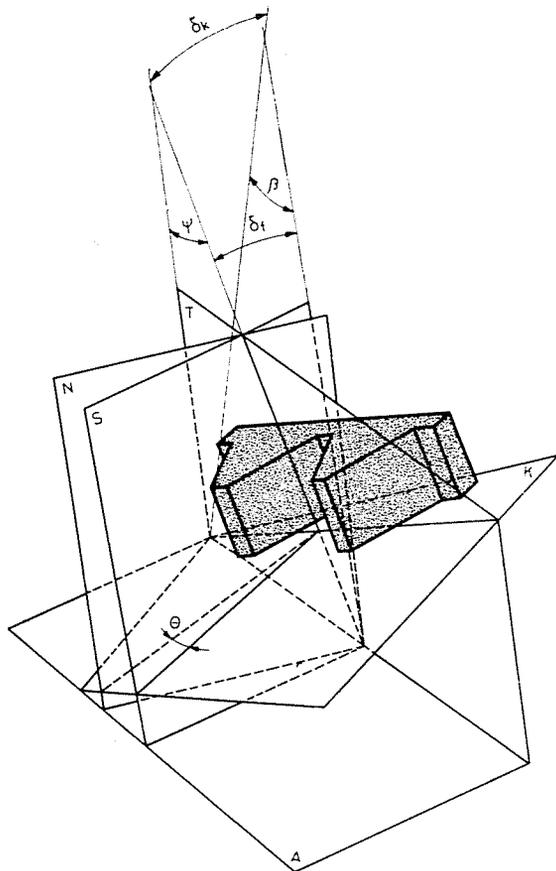


Рис. 3

Из фигуры следует, что плоскости S и N не совпадают, а образуют угол θ — угол асимметричности.

Шаг конструктивной рейки t_n измеряется в плоскости, перпендикулярной плоскости A и S , а шаг технологической рейки t_{nm} — в плоскости TI , чем и объясняется их отклонение.

2. Технологический расчет зуборезного колеса

Под технологическим расчетом подразумевается определение формы и положения технологической рейки, расчет инструмента и настройка станка для образования этой рейки.

а) Фрезерование зубьев на зубофрезерном станке

Инструментальная рейка, лежащая в основе проектирования червячной фрезы, обрабатывающей зубья зуборезного колеса, одинакова с технологической рейкой. Параметры червячной фрезы в ее нормальном сечении определяются параметрами технологической рейки (смотри фиг. 2):

профильные углы

$$\alpha_{wh} = \alpha_w + \Theta \quad (4)$$

$$\alpha_{wt} = \alpha_w - \Theta$$

нормальный шаг фрезы

$$t_{nm} = \frac{\pi m}{\cos \Theta} \quad (5)$$

Формулы показывают, что профильные углы червячной фрезы на острой и на тупой стороне не одинаковые, а отличаются друг от друга на величину 2Θ . Формула (5) показывает, что нормальный шаг червячной фрезы всегда больше нормального шага зуборезного колеса. Это обстоятельство учитывается так, что фреза рассчитывается на фиктивный модуль

$$m_m = \frac{m}{\cos \Theta} \quad (6)$$

Расчет наладки зубофрезерного станка сильно отличается от настройки станка для фрезерования зубчатого колеса. На фиг. 4 показана схема движений инструмента в процессе зубонарезания.

Результирующая подача \bar{e} фрезы лежит в плоскости T_1 .

Необходимо подчеркивать, что составляющие подачи, радиальная \bar{e}_R , аксиальная \bar{e}_A и тангенциальная \bar{e}_T рассчитываются не просто по заданному углу δ_k и по углу наклона β .

Задача составляющих подач заключается в том, чтобы фреза передвигалась в технологической рейке по направлению результирующей подач \bar{e} . (смотри фигуру 4).

Трудность расчета настройки станка (расчета подач) заключается в том, что из-за специфического характера тангенциальной подачи \bar{e}_T , ортогональный триэдер $[\bar{e}_A; \bar{e}_T; \bar{e}_R]$, конструкционно существующий на станке, преобразуется в $[\bar{e}_A; \bar{e}_\beta; \bar{e}_\delta]$ общий (косой) триэдер.

Значит результирующую подачу \bar{e} необходимо разлагать по этим осям.

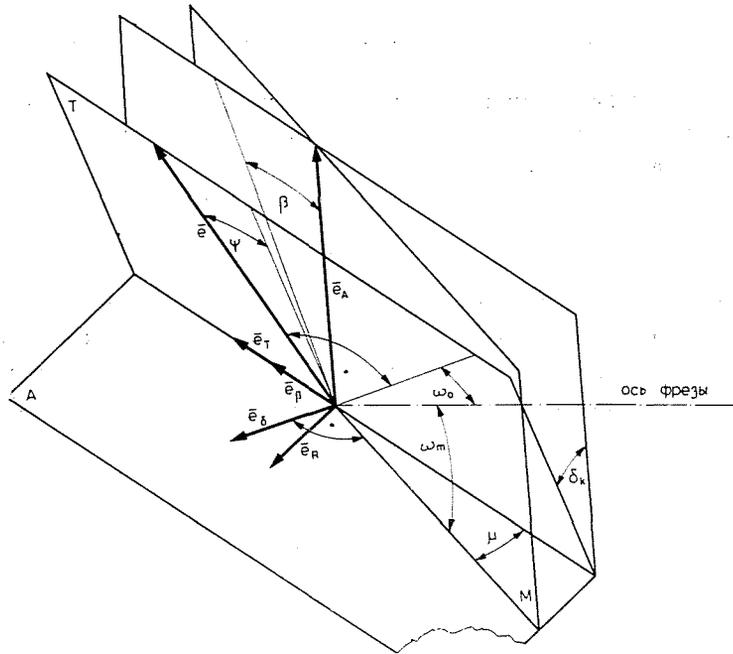


Рис. 4

По фигуре видно, что действительная тангенциальная подача \bar{e}_T не лежит в плоскости M , содержащей ось червячной фрезы и осевую подачу \bar{e}_A .

Так как действительная радиальная подача не перпендикулярна к тангенциальной подаче, а образует с ней угол $90-\mu$, то величину действующих подач рассчитывают по следующим формулам:

$$\begin{aligned}
 e_A &= 1 \\
 e_T &= \operatorname{tg} \beta \\
 e_\beta &= e_T - e_\delta \cdot \sin \mu \\
 e_\delta &= \frac{e_R}{\cos \mu}
 \end{aligned}
 \quad (7)$$

Цифровые значения подач e_β и e_δ при $e_A = 1$ равняются тангенсам углов β_m и δ_m , по которым уже непосредственно можно рассчитать настройку станка.

$$\begin{aligned}
 \operatorname{tg} \beta_m &= \operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \delta_k \operatorname{tg} \mu \\
 \operatorname{tg} \delta_m &= \frac{\operatorname{tg} \delta_k}{\cos \mu}
 \end{aligned}
 \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned}
 \operatorname{tg} \mu &= \operatorname{tg}(\psi - \omega_0) \sin \delta_k \\
 \operatorname{tg} \psi &= \operatorname{tg} \beta \cdot \cos \delta_k
 \end{aligned}$$

Если направления зубьев зуборезного колеса и червячной фрезы совпадают, то в формуле для μ стоит знак $(-)$, в противном случае $(+)$.

Формулы (8) показывают, что при зубонарезании косозубых зуборезных колес дифференциал станка i_φ настраивается не на угол наклона β или шага H , а на технологические параметры β_m или H_m . По формулам можно установить, что технологический шаг всегда больше конструкционного (смотри фиг. 5)

$$H_m > H$$

Цепь радиальной подачи, подобно вышесказанному, настраивается не на величину δ_k , а δ_m , то есть

$$\delta_m > \delta_k$$

(смотри фигуру 6).

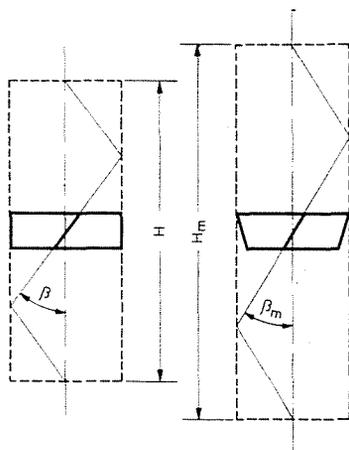


Рис. 5

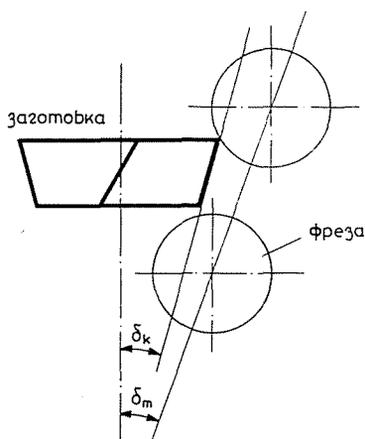


Рис. 6

Формулы (8) действительны и для прямозубых зуборезных колес, если в них подставить

$$\beta = 0$$

Интересно отметить, что даже при нарезании зубьев этих инструментов станок необходимо настроить на фрезерование спиральных зубьев.

Правда, это положение в первую очередь интересно с теоретической точки зрения, так как приближенный метод настройки не приводит на практике к значительным погрешностям.

Вторая особенность настройки станка для нарезания зубьев заключается в том, что угол поворота инструментальной головки не равен принятой для цилиндрических зубчатых колес величине

$$\beta - \omega_0$$

а сильно отличается от нее. Согласно фигуре 4. инструментальная головка должна быть повернута в плоскости I. на величину

$$\varphi - \omega_0$$

чтобы направление инструментальной рейки фрезы совпало с результирующей подачей e . Но на станке конструктивно такой оси поворота не существует. Эта ось поворота всегда перпендикулярна к плоскости M , а не к плоскости T , значит величина поворота фрезы ω_m должна быть специально рассчитана. Формула для определения величины ω_m легко выводится по формуле 4:

$$\sin \omega_m = \sin (\psi - \omega_0) \cos \delta_k \quad (9)$$

Согласно формуле (9) при зубофрезеровании косозубых зуборезных колес, инструментальная головка станка должна поворачиваться на меньший угол, чем при нарезании зубьев цилиндрического зубчатого колеса с углом наклона зубьев β червячной фрезой с углом подъема ω_0 (смотри фигуру 7).

Пренебрежение этим обстоятельством приводит к искажению профиля нарезаемых зубьев и к значительному изменению боковых задних углов червячной фрезы, и одновременно к уменьшению ее стойкости.

б) Шлифование зубьев

Шлифование зубьев зуборезного колеса может производиться на зубошлифовальных станках различного типа. На практике наиболее часто для этой цели применяются:

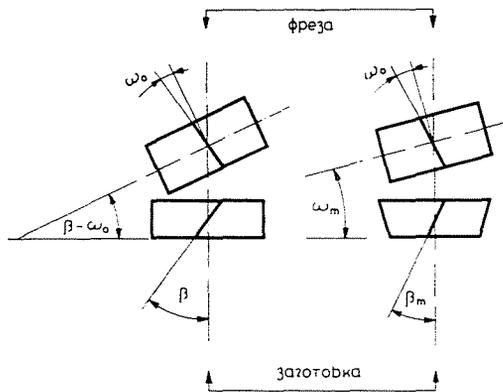


Рис. 7

- станки, работающие двухпрофильным кругом с конической рабочей поверхностью (Нильс и т. п.);
- станки, работающие тарельчатым кругом, с плоской рабочей поверхностью (станки 5А893; Хурт; и т. п.)

Для станков второй группы настройка ничем не отличается от настройки для шлифования косозубых цилиндрических колес, принимая во внимание, что боковые поверхности зубьев зуборезного колеса оформляются по винтовым поверхностям определенных параметров.

Расчет настройки станков типа Нильс ведется аналогично зубофрезерному станку, хотя из-за кинематических отличий этих двух станков они в кое-чем отличаются друг от друга.

Профильные углы шлифовального круга совпадают с профильными углами червячной фрезы (смотри фиг. 2 и формулы 4), если, конечно, обкатка в обоих случаях ведется по одной и той же начальной окружности зуборезного колеса.

Для того, чтобы шлифовальный круг перемещался в технологической рейке, люльку станка и ось шлифовального круга необходимо поворачивать на соответствующие углы

$$\omega_b \text{ и } \omega_k.$$

Эти два поворота обеспечивают требуемый задний угол δ_k и угол наклона зубьев β .

Так как из двух осей поворота ось поворота люльки B является неподвижной и параллельна направлению движения технологической рейки, то величина поворота будет равна δ_k . При этом ось поворота шлифовальной головки K так же повернется на этот же угол δ_k , значит она будет перпендикулярна плоскости T_1 (смотри фиг. 3).

Поэтому поворот шлифовальной головки происходит в плоскости ПІ. Угол поворота равен «углу наклона» в этой плоскости. Проекция этого угла и есть действительный угол наклона зубьев β .

Значит углы поворота равняются:

$$\omega_v = \delta_k \quad (10)$$

$$\omega_k = \psi$$

(смотри фиг. 8)

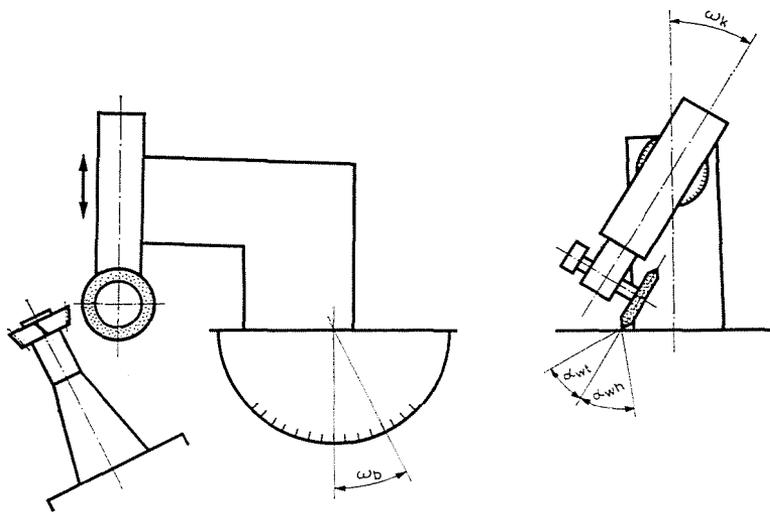


Рис. 8

Во многих случаях максимальный угол поворота люльки станков типа «Нильс» меньше, чем требуемый задний угол δ_k . В таких случаях применяется специальная настройка, при которой люлька поворачивается на максимально возможный угол и шлифование ведется раздельно для острой и тупой стороны. Методика расчета этой специальной настройки содержится в прилагаемой блоксхеме.

3. Выводы

С целью упрощения процесса конструктивно-технологического расчета и повышения его наглядности была составлена расчетная блоксхема. Использование этой блоксхемы даже при ручном расчете имеет смысл, так как при этом резко уменьшается время технической подготовки; весь расчет выполняется одним специалистом (обычно конструктором инструментального бюро), исключаются лишние, повторные расчеты, сокращаются до минимума

ошибки, связанные с неувязкой работы конструктора, технолога и инструментальщика.

При ведении расчетной работы на вычислительной машине данная блок-схема может служить частью общего алгоритма. В ряде случаев, особенно при изготовлении чистового зуборезного инструмента, данная блок-схема дополняется блоками расчета координат режущей кромки, блоками зависимостей ограничивающих условий и т. п. Данная работа, не касаясь этих вопросов, ограничивается конструктивно-технологическим расчетом (определением) основного зуборезного колеса.

Проблемы, изложенные в данной работе, были поставлены конкретными производственными задачами, а также стремлением перевести всю работу технической подготовки на вычислительные машины. Основные положения, содержащиеся в данной, работе были проверены в условиях единичного и серийного выпуска этих зуборезных инструментов.

Резюме

В докладе рассматриваются долбяки и обкаточные резцы для обработки цилиндрических зубчатых колес, с точки зрения теории зубчатого зацепления и технологии изготовления зуборезного инструмента. Приводится точный метод расчета инструмента. Раскрываются особенности технологии изготовления зуборезных инструментов данного типа. Приводится метод расчета специальной настройки зубофрезерного и зубошлифовального станков, а также указание по проектированию вспомогательных инструментов.

Обозначения

- α_0 — профильный угол в нормальном сечении
- m — нормальный модуль
- z — число зубьев зуборезного колеса
- γ — передний угол на вершинах зубьев
- δ_f — задний угол на вершинах зубьев
- β_f — угол наклона зубьев
- d_0 — диаметр делительной окружности зуборезного колеса
- α_s — профильный угол боковой поверхности зубьев в нормальном сечении
- α_h — профильный угол острой боковой поверхности зубьев в торцевом сечении
- α_t — профильный угол тупой боковой поверхности в торцевом сечении
- α_w — угол в нормальном сечении между плоскостью симметрии и боковой поверхностью технологической рейки
- δ_k — угол конуса вершин зубьев
- δ_0 — боковой задний угол
- β_h — угол наклона острой боковой поверхности
- β_t — угол наклона тупой боковой поверхности
- t — окружной торцевой шаг
- t_n — нормальный шаг зуборезного колеса
- t_{nm} — нормальный шаг червячной фрезы
- Θ — угол асимметричности технологической рейки
- ψ — вспомогательный параметр
- μ — вспомогательный параметр
- d_{ah} — диаметр основной окружности зуборезного колеса для острой стороны
- d_{at} — диаметр основной окружности зуборезного колеса для тупой стороны
- $\alpha_{w/h}$ — профильный угол исходного контура технологической рейки для острой стороны

- α_{wt} — профильный угол исходного контура технологической рейки для тупой стороны
 ω_0 — угол подъема витка червячной фрезы
 ω_m — угол разворота фрезерной головки
 d_g — диаметр начальной окружности
 ω_b — угол поворота люльки
 ω_k — угол поворота шлифовальной головки
 H — шаг зубьев зуборезного колеса
 H_n — шаг острой боковой винтовой поверхности зубьев
 H_t — шаг тупой боковой винтовой поверхности зубьев
 C — поправочный коэффициент формы передней поверхности
 H_m — технологический шаг зубьев при зубофрезеровании
 β_m — технологический угол наклона зубьев при зубофрезеровании
 δ_m — угол настройки радикальной подачи
 m_m — модуль червячной фрезы для фрезерования зубьев зуборезного колеса

Литература

1. И. И. Семенченко, В. М. Матюшин, Г. Н. Сахаров: Проектирование металлорежущих инструментов. Машгиз 1962.
2. С. И. Лашнев: Формообразование зубчатых деталей. Машиностроение 1971.
3. ЭССЕРТ, W.: Abwälzschälén von inneren Zahnradkránzen an einer Maschine neuen Systeme Gép 1970, No. 1.
4. BALI JÁNOS: A fogaskerék lefejtőmaró és metszőkerék kölcsönös kapcsolódásáról. Gép 1972, No. 10.

Янош БАЛИ, Н—1521 Будапешт