

Отсюда следует, что при испытании на изгиб в пределах упругих деформаций двух геометрически подобных зубьев за деформационную характеристику могут быть приняты:

а) перемещение контактной линии пуансона с зубом— s , при этом

$$s_1 \parallel s_2 \text{ и } \frac{s_1}{m_1} = \frac{s_i}{m_i}$$

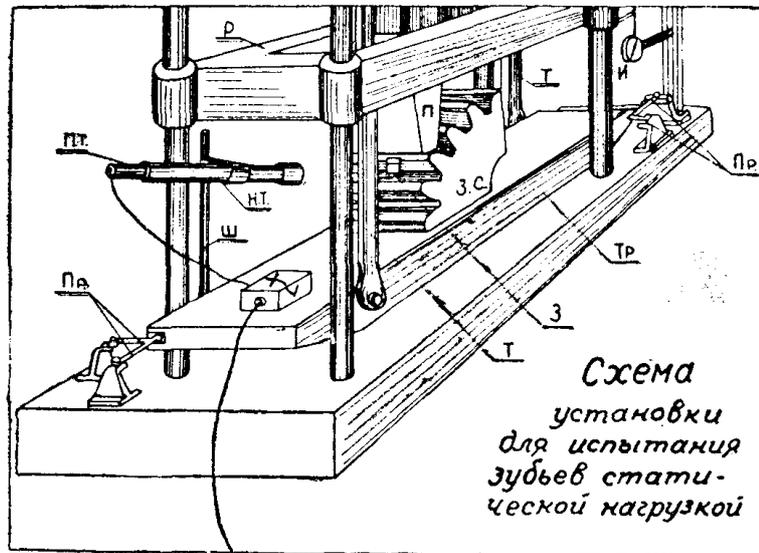
или

б) угол изгиба зуба

$$\beta_1 = \beta_i = \text{const.}$$

Для проверки высказанных положений при равных углах изгиба определялись нормальные давления, действующие на геометрически подобные зубья.

Испытание зубьев на изгиб проводилось на универсальном испытательном прессе, схема которого приведена на фиг. 1. Рабочий стол машины (P) на нижней своей плоскости имеет круглый паз, в котором на диске укреп-



Фиг. 1

ляется пуансон (II). Пуансон с диском соединен винтовой парой. Чтобы выполнить условия подобия в приложении нагрузки, были специально изготовлены четыре геометрически подобных пуансона, соответственно $m = 5, 10, 14$ и 20 мм. Модель (З.С.) устанавливалась на траверзу—подвижную опору (Тр.), которая подвешена на станине машины при помощи двух тяг (Т), расколенных по диагонали опоры. По второй диагонали траверза при помощи пружин (Пр) соединяется со станиной машины. Благодаря такому устройству траверза имеет возможность некоторых перемещений в продольном и поперечном направлениях и таким образом выполняет функции сферического подпятника. При соприкосновении пуансона с зубом модели происходило выравнивание возможных перекосов, и модель вместе с траверзой занимала рабочее положение. Измерение углов изгиба зубьев проводилось зеркальным методом, по отклонению на экране проекции светящейся нити. Для этого нами была смонтирована установка по следующей схеме (фиг. 1). В неподвижном штативе (Ш) на станине машины была укреплена оптическая система, состоящая из неподвижной трубы (НТ), несущей объектив, и подвижной трубы (ПТ), несущей лампочку с „s“-образной тонкой нитью, приключенной к трансформатору на 4,5 в. На торец зуба жидким

стеклом приклеивалось в специальной оправке зеркальце (3). Через объектив луч света при помощи подвижной трубы фокусировался на зеркальце, откуда отражался на экран, установленный от центральной линии пуансона на расстоянии 4420 мм. По отклонению проекции светящейся нити на экране измерялся двойной угол изгиба зуба.

Проделанный нами анализ возможных погрешностей в измерении углов изгиба зубьев и причин, их вызывающих, позволил сделать вывод о надежности данного метода и объективности показаний.

Тарировка шкалы была произведена по зубу $m = 5$ мм. Зуб нагружался в пределах упругих деформаций до нагрузки от 0 до 1500 кг, что составляет для стали Ст 6—0,78 P_s и стали 45—0,74 P_s , где P_s —расчетная нагрузка на пределе текучести. Через каждые 500 кг производилась отметка угла изгиба на шкале. Данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

Модуль m мм	Степень нагружения		Угол изгиба зуба в единицах шкалы мм	
	Условное обозначение угла изгиба зуба	Нормальное давление на зуб P_n кг	Ст 6	Сталь 45
5	β_1	500	12	10
	β_2	1000	24	20
	β_3	1500	36	30

Опыты с зубьями модулей $m = 10, 14$ и 20 мм проводились в обратном порядке. Зуб нагружался нормальным усилием и при углах изгиба $\beta_1, \beta_2, \beta_3$, отсчитываемых по шкале, производились замеры нагрузок. При разгрузке зуба проекция светящейся нити на шкале плавно возвращалась в свое начальное положение, что говорит о точности данной методики. Измерение углов и замер нагрузок предварительно были отработаны на значительном количестве опытов. Для окончательных опытов были отобраны по три зуба каждого модуля с геометрически подобными опорными поверхностями, которые подвергались чистовой фрезеровке и выверке по плите. С каждым зубом было проведено по 3 опыта.

Результаты опытов

В табл. 2 приведены средние значения величин, полученных из опытов.

Из данных опытов с геометрически подобными стальными зубьями следует:

1) при одинаковых углах изгиба зуба ($\beta_i = \beta_j$) $\lambda_{опытн}$ не совпадают с $\lambda_{теоретич}$ (фиг. 2), причем

$$\lambda_{опытн} < \lambda_{теоретич}.$$

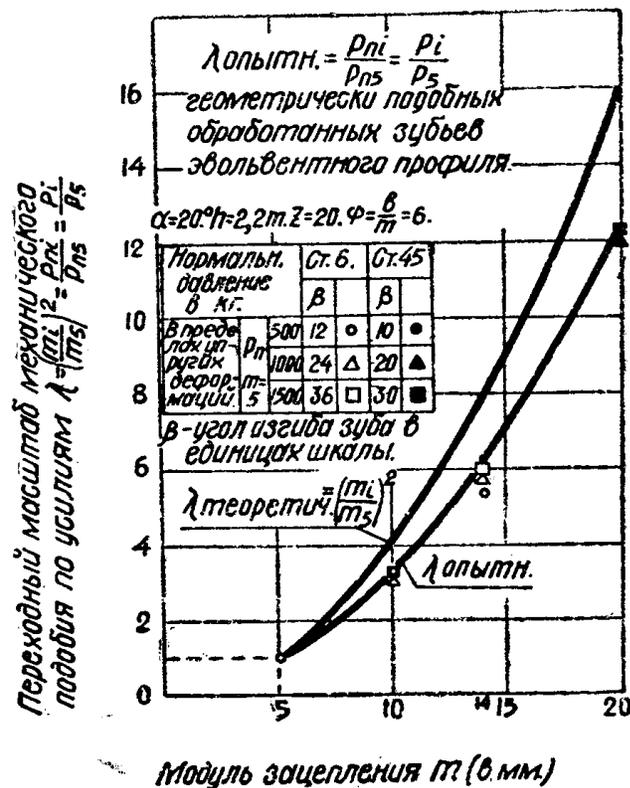
При диапазоне $m = 5 \div 20$ мм и при $m = 5$ мм, принятом за единицу сравнения, отношение $\frac{\lambda_{опытн}}{\lambda_{теоретич}}$ составляет величину порядка 75%;

2) отклонение от закона механического подобия подчиняется закономерности, ясно выраженной на графиках „ $\sqrt{\lambda} - m$ “ (фиг. 3) прямой линией.

Таким образом, исследования показывают, что влияние размеров зуба на его относительную прочность в пределах упругих деформаций проявляется и для геометрически подобных зубьев из стали, а закономерность отклонения от закона подобия имеет тот же характер, что и для геометри-

Таблица 2

m мм	Количество опытов	Угол изгиба зуба		Нормальное давление P _n кгс	$\lambda_m = \left[\frac{m_i}{m_5} \right]^2$	$\lambda_0 = \left[\frac{P_{ni}}{P_{n5}} \right]$	$\frac{\lambda_0}{\lambda_m} \cdot 100\%$	$\sqrt{\lambda_m}$	$\sqrt{\lambda_0}$
		Условное обозначение	В единицах шкалы						
Материал Ст 6									
5	17	β ₁	12	500	1	1	100	1	1
		β ₂	24	1000		1			
		β ₃	36	1500		1			
10	9	β ₁	12	1610	4	3,22	80,5	2	1,80
		β ₂	24	3100		3,10			1,77
		β ₃	36	4820		3,22			1,80
14	9	β ₁	12	2660	7,84	5,32	68,0	2,8	2,3
		β ₂	24	5760		5,76			2,4
		β ₃	36	9030		6,01			2,45
Материал сталь 45									
5	17	β ₁	10	500	1	1	100	1	1
		β ₂	20	1000		1			1
		β ₃	30	1500		1			1
20	9	β ₁	10	5325	16	10,66	66,5	4	3,26
		β ₂	20	11995		11,99			3,46
		β ₃	30	18406		12,27			3,50



Фиг. 2

чески подобных зубьев из хрупкого материала—чугуна. Это позволяет установить коэффициент неравнопрочности (K_H), учитывающий понижение прочности с увеличением геометрических размеров зуба в той же форме, что и для чугунных зубьев [1], а именно:

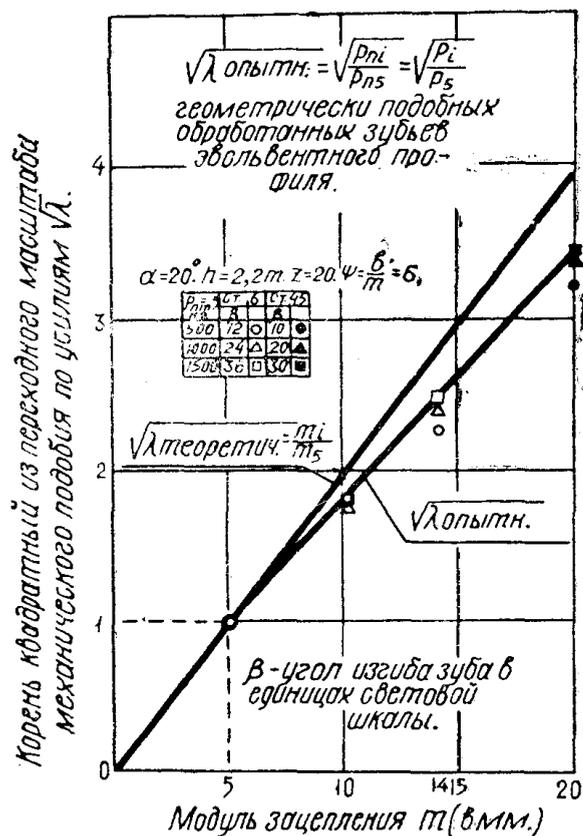
$$K_H = \frac{\lambda_{\text{опытн}}}{\lambda_{\text{теоретич}}} = m_1^2 \left[\frac{1 + (m_i - m_1) \operatorname{tg} \theta_0}{m_i} \right]^2,$$

где m_1 — модуль зуба, принятого за единицу сравнения,
 m_i — модуль зуба, для которого определяется величина K_H .

$\operatorname{tg} \theta_0 = \frac{\sqrt{\lambda_0} - 1}{m_i - m_5}$ — тангенс угла наклона опытной кривой „ $\sqrt{\lambda} - m$ “ к оси „ m “.

$$\text{При } m_1 = 5 \text{ мм } K_H = 25 \left[\frac{1 + (m_i - 5) \operatorname{tg} \theta_0}{m_i} \right]^2.$$

Для Ст. 6 и стали 45 опытами установлено среднее значение $\operatorname{tg} \theta_0 = 0,168$.



Фиг. 3

Для практического пользования для Ст. 6 и стали 45 можно рекомендовать

$$K_H = \left[0,84 + \frac{0,8}{m_i} \right]^2.$$

Объяснение результатов

Автор, используя данные исследований Н. П. Шапова, Л. С. Мороза и С. С. Шуракова, а также соображения Я. Б. Фридмана, делает первую попытку объяснить влияние размеров стального зуба на его относительную прочность в пределах упругих деформаций.

Н. П. Шапов [3] исследовал влияние твердого поверхностного слоя на статическую и ударную прочность металла. В результате таких технологических операций, как азотирование, цементация, накатка, поверхностная закалка, происходит повышение стойкости детали против износа; в то же время это сопровождается потерей пластичности в поверхностной зоне, где образуется весьма хрупкий слой металла. Испытанию подвергались образцы квадратного сечения из рамной стали типа Ст. 5. Хрупкий поверхностный слой был создан цементацией без последующей термической обработки. Опытами было установлено, что при статическом изгибе с увеличением размеров образцов предел прочности уменьшается. Это явление Н. П. Шапов объяснил возможностью развития пластической деформации в подкорковом слое металла, которая, по его мнению, незначительна для того, чтобы дать заметное изменение формы образца, но достаточна для того, чтобы сделать неизбежным образование хрупкой трещины.

Л. С. Морозом и С. С. Шураковым [4] в результате большого исследования причин аварий тяжело нагруженных цементируемых шестерен было установлено „полное отсутствие связи между вязкими свойствами сердцевин и поломками зубьев шестерен“. Это привело их к постановке специального исследования вопросов прочности цементованных изделий. В результате цементации на поверхности образца образуется весьма хрупкий слой металла. Сердцевина образца обладает вязкими свойствами. При изгибе цементованный слой претерпевает только упругие деформации, в то время как в подкорковой зоне развивается местная пластическая деформация, которая понижает прочность поверхностного слоя, создает условия для образования хрупкой трещины и в результате понижает прочность образца в целом. С увеличением твердости сердцевин ими наблюдался рост разрушающего усилия.

На роль местной пластической деформации указывает Я. Б. Фридман, который пишет: „Большинство наблюдающихся расхождений между выводами сопротивления материалов и реальным поведением металлов объясняется именно влиянием местной пластической деформации“ [5].

В наших исследованиях испытанию на изгиб подвергались стальные эвольвентные зубья, нарезанные червячными фрезами. Поковки перед механической обработкой нормализовались. Зубчатые колеса после нарезания дополнительной термической обработке не подвергались. Процесс нарезания зубьев связан со значительной пластической деформацией металла, в результате которой поверхностные слои материала зуба упрочняются, повышается их предел текучести и уменьшается пластичность.

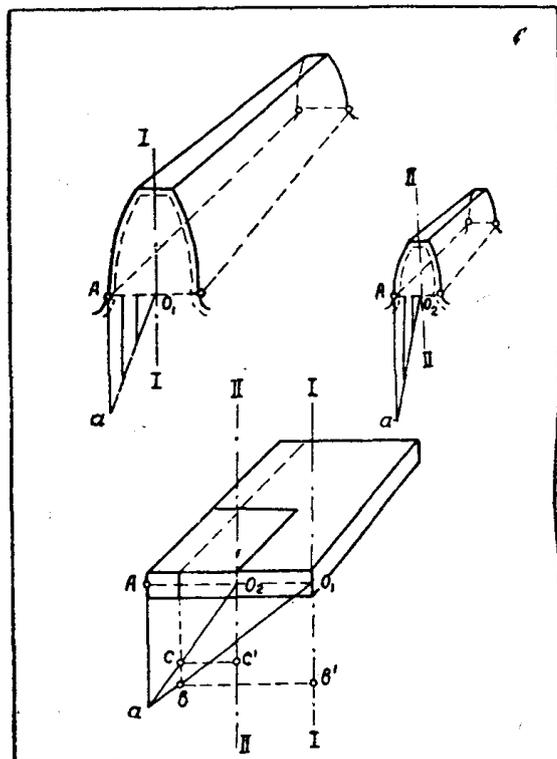
Выясним влияние размеров зуба с наклепанным поверхностным слоем на величину напряжений в подкорковом слое в пределах упругих деформаций. Допустим, что в какой-то момент изгиба напряжения в одноименных точках A (фиг. 4) переходных кривых двух геометрически подобных зубьев равны по величине. Примем глубину наклепанного слоя одинаковой для обоих зубьев. По высоте опасного сечения каждого зуба выделим элементарный объем материала. Так как зубья геометрически подобны, то сказанное выше может быть представлено одним чертежом, где Aa — напряжение в одноименной точке переходной кривой; O_1a и O_2a — законы распределения напряжений в опасных сечениях; Π и $\Pi\Pi$ — оси симметрии зубьев.

Из рассмотрения фиг. 4 становится очевидным, что при равном напряжении в точке A переходной кривой напряжения в подкорковом слое не равны между собой, причем с увеличением размеров зуба они растут

$$O_1b' = \sigma_{n_1} > O_2c' = \sigma_{n_2}.$$

Отсюда можно сделать вывод, что с увеличением размеров зуба увеличивается интенсивность развития, а следовательно, и объем подкорковых

слоев, охваченный местной пластической деформацией. Это ведет, в свою очередь, к понижению прочности наклепанного слоя, к возможности образования хрупкой трещины и в результате—к понижению прочности зуба. Наблюдаемое нами в процессе испытаний понижение нагрузки с увеличением размеров зуба против нагрузки по закону подобия при одинаковых углах изгиба подтверждает правильность рассуждений.



Фиг. 4

Развитие местной пластической деформации поверхностных слоев материала зуба, очевидно, возможно и при отсутствии наклепанного слоя. При этом различный перепад напряжений в опасном сечении для малого и большого зуба обусловит также различный объем поверхностных слоев, охваченных пластической деформацией, что поведет к понижению прочности с увеличением зуба.

В подтверждение своей мысли приведем соображения Я. Б. Фридмана. Он указывает, что у твердых тел всегда наблюдается не чисто пластическая, а упруго-пластическая деформация. Рассматривая статические испытания надрезанных образцов на растяжение, он пишет: „У пластических металлов до разрушения наблюдается кардинальное изменение напряженного состояния, поверхностные слои ранее переходят в пластическую область, а надрезанный образец ведет себя как состоящий из материалов с различными модулями. Поверхностные слои, находящиеся в пластической области, имеют малый, а внутренние—большой „модуль“, равный модулю упругости“. И далее... „При изгибе, который вызывает неравномерность напряженного и деформированного состояния даже у гладких образцов, соотношение между объемностью и неравномерностью изменено по сравнению с растяжением в пользу неравномерности. Поэтому при пластическом изгибе надрезанных образцов труднее осуществляется перемещение максимума напряжений с поверхности внутрь образца. И действительно, Маттеас обнаружил, что ряд материалов (Fe с 0,4%С, сталь 50 и т. д.), которые при растяжении

с надрезом давали повышение сопротивления разрушению, при изгибе с надрезом давали понижение прочности на 25—38% [5].

Таким образом, можно полагать, что в пределах упругих деформаций развитие местной пластической деформации в поверхностных слоях материала понижает прочность с увеличением размеров зуба. Твердая поверхностная корка (наклеп, цементация, поверхностная закалка) влияет лишь на степень развития местной пластической деформации, которая в свою очередь снижает прочность поверхностного слоя и тем самым создает условия для возникновения хрупкой трещины. Хрупкая трещина играет решающую роль в сопротивлении зуба, и ее появление освобождает часть накопленной потенциальной энергии упругой деформации, за счет которой происходит дальнейшее, по характеру динамическое, разрушение сердцевины.

Современные методы поверхностного упрочнения (цементация, закалка токами высокой частоты и т. д.) дают возможность получать поверхности зубьев, весьма стойкие против истирания. Поэтому в настоящее время вопросы прочности зубьев на изгиб приобретают весьма важное значение при решении задачи увеличения несущей способности и долговечности зубчатых передач. Решение данной задачи требует глубокого изучения факторов, влияющих на прочность зуба.

Как показало исследование автора, влияние геометрических размеров зуба на его относительную прочность при статическом изгибе существенно. Установленный коэффициент неравнопрочности зубьев позволяет в простой форме учесть это влияние, скорректировать допускаемое напряжение в сторону увеличения, что в конечном счете поведет к уменьшению размеров зуба и к увеличению несущей способности передач.

Дальнейшей задачей должно явиться исследование влияния размеров зуба на его относительную усталостную прочность при изгибе.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Р о д и о н о в И. В. Влияние размеров чугунного зуба на его относительную прочность при изгибе. Изв. ТПИ, т. 75.
2. К и р п и ч е в В. А. О подобии при упругих явлениях. Журнал Русского химического общества и физического общества при императорском С.-Петербургском университете, том VI, вып. 9, часть физическая, отдел первый, 1874, стр. 151—155.
3. Щ а п о в Н. П. Влияние твердого, хрупкого поверхностного слоя на статическую и ударную прочность металла. Сб. „Трение и износ в машинах“. Изд. АН СССР, т. 1, стр. 113—132, М.-Л.
4. М о р о з Л. С., Ш у р а к о в С. С. Проблема прочности цементованной стали. Л. 1947. Министерство транспортного машиностроения. Центральный Ордена Ленина научно-исследовательский институт.
5. Ф р и д м а н Я. Б. Механические свойства металлов. Оборонгиз, М. 1946.