

УДК 621.923

Петрусенко Л.А.; Антонюк В.С.

НТУУ «Киевский политехнический институт им. И.Сикорского» г. Киев, Украина

РАСЧЁТ НАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ОПАСНОЙ ЗОНЕ ЛЕЗВИЙНОЙ ЧАСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Petrusenko L., Antonyuk V.

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (vp@kpi.ua)

CALCULATION OF STRESS, WHICH RESULTING IN AHAZARD ZONE OF BLADE PART OF THE CUTTING TOOL

Проведен анализ работ по прочности лезвийного инструмента и предложена методика расчёта напряжений, возникающих в опасной зоне режущей части инструмента, по преобразованной формуле Бетанели А.И.

Установлены основные факторы определяющие прочность режущей части лезвийного инструмента и предложен метод построения номограмм для определения геометрических параметров режущей части инструмента по критерию «нулевого» уровня напряжений на передней поверхности.

Приведен пример расчета напряжений в режущей части лезвийного инструмента и определены оптимальные значения его переднего угла по критерию прочности.

Ключевые слова: лезвийный режущий инструмент, геометрические параметры сила резания, напряжения, прочность.

Введение. Режущий инструмент является ключевым элементом технологической системы, непосредственно реализующим функцию удаления срезаемого слоя в процессе обработки на станках. В то же время именно режущий инструмент обладает наименьшей надёжностью в структуре технологической системы [1].

Для лезвийного твердосплавного режущего инструмента, кроме обеспечения износостойкости, актуальным является обеспечение прочности и прочностной надёжности. Воздействие повышенных силовых и температурных нагрузок часто приводит к «внезапным» отказам работоспособности инструмента из-за его разрушений – выкрашиваний и сколов в процессе резания.

При черновой обработке, прерывистом резании и в других сложных условиях, хрупкое разрушение в 60% и более случаев наступает задолго до достижения предельного износа [2].

Хрупкое разрушение режущей части твердосплавного инструмента – нерегламентируемый вид отказов работоспособности, приводящий либо к неустраняемым поломкам инструмента, либо к большим потерям при переточках, что снижает эффективность обработки деталей.

Актуальность этого вопроса определяется следующими факторами:

- увеличение доли заготовок из труднообрабатываемых материалов, при обработке которых более характерны отказы работоспособности не по критерию износа, а по разрушениям;

- расширение применения твердосплавного инструмента на операциях прерывистого резания (фрезерование, строгание, зубообработка и др.);

- технологическое оборудование, на котором обработка ведётся без постоянного контроля со стороны станочника (станки с ЧПУ и другое автоматизированное оборудование). Потери от внеплановых простоев или брака деталей из-за поломок инструмента резко снижают эффективность обработки в производстве.

- экспериментальные методы оценки прочности режущей части инструмента дороги, трудоёмки и ненадёжны, а удобные инженерные расчётные методы определения возникающих напряжений практически отсутствуют;

- имеющиеся объяснения влияния различных факторов (геометрия клина, режимы резания) на прочность режущей части, как правило, не базируются на расчётах напряжений и часто носят субъективный и противоречивый характер.

Задача расчетного определения оптимальных значений параметров режущей части представляет собой актуальную проблему, как для теории резания, так и для практики металлообработки.

Хотя в этой области имеются многочисленные исследования, многие принципиальные вопросы, особенно в части установления причин, вызывающих этот вид отказов работоспособности, не имеют достаточно убедительных объяснений [3-6].

И до сих пор не потеряла своё значения фраза из работы Т.Н. Лоладзе: «На практике при обработке многих материалов во избежание разрушения инструмента снижают режимы резания. Поэтому повышение прочности режущей части инструмента является весьма важной для производства проблемой.

Изучение механизма разрушения, установление его закономерностей, создание инженерных методов расчета прочности режущей части инструмента, являются актуальными вопросами теории резания материалов» [2].

Чрезвычайно важному и, в то же время, сложному вопросу прочности режущей части инструмента посвящены многочисленные исследования Андреева Г.С., Бетанели А.И., Вульфа А.М, Остафьева В.А., Хаета Г.Л. и других ученых. В работах многих исследователей, занимавшихся проблемами прочности часто можно встретить выражения «...такой-то фактор повышает прочность режущей части» или «такой-то снижает прочность». Но эти понятия (за исключением испытаний на предельную толщину среза, или «ломающую подачу») имеют скорее «качественный», чем количественный смысл [1-7].

При оценке влияния каких-либо факторов на прочность режущей части инструмента необходимо учитывать, что многие методы повышения прочности (т.е. снижения напряжений) одновременно сопровождаются многократным ростом сил резания (например, изменение величины переднего угла, округление кромок, упрочняющие фаски).

Следовательно, всё решают не сами по себе величины сил, а уровни вызываемых ими напряжений. И без получения расчётных данных об уровнях возникающих в конкретной зоне режущей части инструмента напряжений при изменении условий обработки (режимы, геометрия клина и др.) точно судить о причинах «повышения» или «снижения» прочности режущей части инструмента нельзя.

Целью настоящей работы является разработка метода расчёта напряжений в опасной зоне, как способа оценки прочности режущей части лезвийного инструмента.

Основная часть. Экспериментальные исследования в области оценки прочности режущей части инструмента, в основном, велись в двух направлениях:

- определение предельной толщины среза $a_{пр}$, при которой при данных условиях (режимы резания, обрабатываемый материал, материал инструмента и геометрия режущей части) происходит хрупкое разрушение режущего клина. В более ранних исследованиях этот метод получил название «метод ломающей подачи»;

- изучение величин силы резания при изменении условий резания, приводящих к хрупкому разрушению. Однако, как правило, исследовалась только динамика или зависимость от различных факторов величины главной составляющей силы - P_z .

Реально применяемые на практике параметры режимов обработки намного ниже, чем «предельные», однако появление случаев хрупкого разрушения и при более низких режимах достаточно велико.

Рассмотрение вопроса прочности режущей части инструмента только с позиций анализа изменения возникающих сил резания может привести либо к неопределённостям, либо подтолкнуть к принципиально ошибочным версиям.

Например, получила достаточно большое число сторонников версия так называемого «подскока» сил при врезании инструмента в заготовку (варианты – «удар при врезании», «всплеск сил», «динамическая сила резания» и т.п.).

Один из известных сторонников версии «подскока» Вульф А.М [3] утверждал, что в момент врезания происходит подскок силы P_{z0} (динамическая сила резания), но даже при 20-кратном увеличении скорости строгания сила резания в момент первоначального контакта повышалась лишь в 1,7 раза.

В то же время в работах некоторых исследователей, прежде всего, Андреева Г.С. [4] доказано отсутствие физических предпосылок для таких «подскоков» силы резания, а снижение скорости в момент врезания – это естественная реакция упругой системы привода станка на прямоугольный, без всяких «всплесков» импульс составляющей P_z .

Эксперименты по регистрации динамики составляющей P_z в момент врезания, в которых обнаруживались «всплески» сил, получены при использовании тензометрических динамометров, включающих упругие звенья, по деформации которых (с последующей статической тарировкой!) судят об изменении силы P_z , т.е. проводилась «подмена» параметров.

При проведении экспериментальных исследований с использованием динамометров на пьезодатчиках (с частотой собственных колебаний 30...50 кГц) [8], а также при анализе результатов непосредственной регистрации картины напряжений при врезании (например, поляризационно-оптическим методом) [9], неизменно отмечался, короткий, но плавный, т.е. не экстремальный, без каких-либо «подскоков», рост составляющей P_z от нуля до установившейся величины.

Анализ напряженно-деформированного состояния режущей части инструмента. Рассматривая вопрос разрушения режущей части инструмента, необходимо учитывать, что имеется несколько зон, в которых могут возникать такие разрушения (Рис.1):

I – вершина режущего клина лезвийного инструмента;

II – контактная зона передней поверхности;

III – задняя поверхность режущей части инструмента;

IV – участок передней поверхности, лежащий за пределами контакта

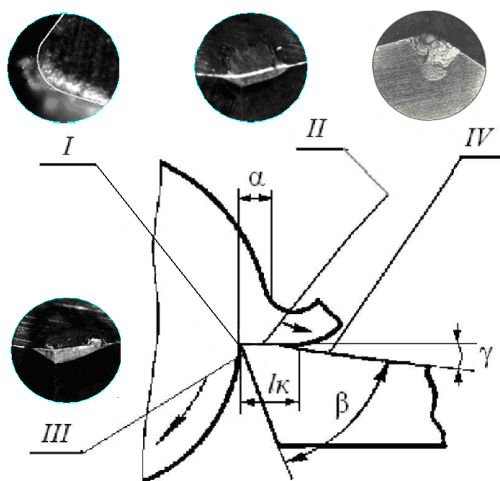


Рис. 1. Зоны разрушения режущей части инструмента:
вершина режущего клина лезвийного инструмента (I); контактная зона передней поверхности (II); задняя поверхность режущей части инструмента (III); передняя поверхность за пределами контакта (IV)

В каждой из этих зон наблюдается свой характер разрушения, условия его возникновения, причины возникновения разрушения, способы повышения прочности, последствия хрупкого разрушения (сохранение работоспособности, способы устранения последствий разрушения и целесообразность восстановления работоспособности режущего инструмента).

Например, локальное разрушение режущей кромки (зона I), происходящее в начале периода резания («осыпание» кромки), хоть и оказывает влияние на процесс резания (силы резания, температуры), всё же оставляет инструмент работоспособным.

Рекомендуемые методы борьбы с «осыпанием» кромки – округление кромки и нанесение фаски под отрицательным углом.

Разрушения, возникающие в контактных зонах (II) и (III) (микротрещины, затем т.н. «сетки» трещин), также не вызывают мгновенной потери работоспособности, но способствуют интенсификации износа. Причиной такого вида разрушения считается действие силовых и тепловых нагрузок в клине, приводящее к усталостному разрушению инструментального материала [7, 10].

Наиболее опасными считаются разрушения в виде «сколов» в зоне (IV) - внезапное отделение крупных частиц лезвия, размеры которых превышают длину контакта. Такой вид хрупких разрушений вызывает мгновенную потерю работоспособности и неустраняемые поломки инструмента, а иногда может привести к браку обрабатываемых деталей.

Сколы могут быть результатом разовых предельных перегрузок (например, «ломающих подач»), но и при меньших нагрузках из-за дефектов в структуре твёрдого сплава или цикличности нагрузок (растягивающих напряжений) возможно зарождение в зоне (IV) микротрещин, которые, развиваясь, могут привести к такому виду хрупкого разрушения [2, 7].

Только в этой зоне режущего клина могут возникать растягивающие напряжения, появление которых нежелательно (опасно) для твёрдых сплавов. Поэтому в работах по прочности инструмента область передней поверхности на расстоянии $1,5 \dots 2,5$ длины контакта (зона IV) получила название «опасная зона».

В работе рассматриваются вопросы прочности лезвийного инструмента, связанные с наиболее опасным видом разрушений – сколами в зоне IV.

В основу расчёта напряжений, возникающих в опасной зоне режущей части лезвийного режущего инструмента принят метод расчётов, предложенный Бетанели А.И [6].

На основании результатов поляризационно-оптических исследований установлено [2, 5, 6, 9], что область растягивающих напряжений в режущем клине начинается в точке отрыва стружки и прилегает к передней поверхности клина, а зона максимальных растягивающих напряжений («опасная зона») расположена на передней поверхности на расстоянии от вершины $1,5 \dots 2,5$ длины контакта.

Это позволяет для расчётов напряжений, возникающих в этой зоне, применить принцип Сен-Венана - замена действующей распределённой нагрузки на сосредоточенную нагрузку, приложенную к вершине клина (Рис. 2).

Для расчётов напряжений за пределами контакта применяются реальные значения составляющих силы резания (по замерам, из графиков или таблиц, по эмпирическим формулам). При этом нет необходимости учёта законов распределения контактных нагрузок, что, само по себе, является достаточно сложной и не до конца решённой задачей.

Это принципиально отличает этот метод от расчёта напряженно-деформированного состояния режущей части инструмента в области, приближённой к вершине, когда неизбежен расчёт числовыми методами, например, матричный метод [5] или широко применяемый в последние годы метод конечных элементов [12].

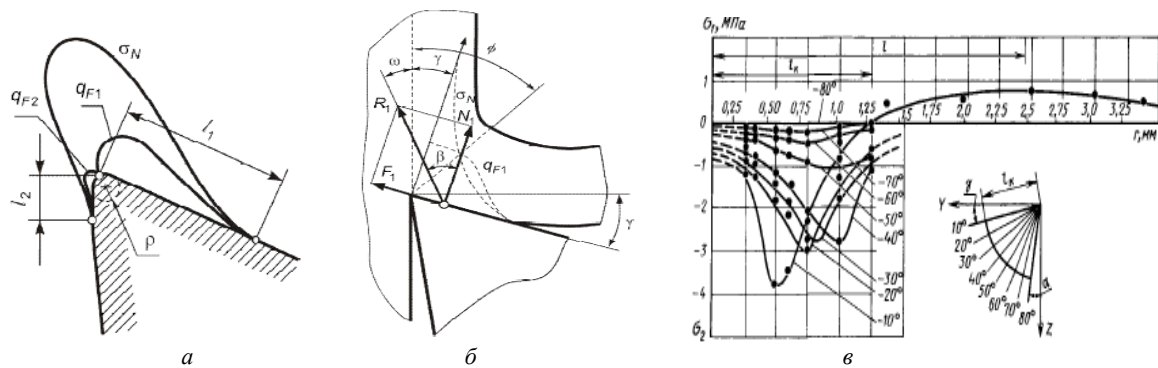


Рис. 2. Схемы нагрузок на режущий клин (а, б) [11] и распределение напряжений в режущем инструменте (в) [2]

Выполненные в работе [5] сравнительные расчёты напряжений в опасной зоне матричным методом и формуле Бетанели А.И. дали практически близкие результаты, что подтверждает возможность применения в этом случае более простого метода.

Рассматривая особенности расчёта прочности режущей части инструмента вне зоны контакта в работе [7] указано, что «ввиду значительного удаления опасной точки от зоны контакта и низкой теплопроводности инструментальных материалов, температура в этих точках не превышает 400...500 С⁰ и незначительно изменяется во времени. Расчёт прочности режущей части инструментов в этом случае ведётся на основании расчётов только напряжений, возникающих под действием силы резания».

Таким образом, отсутствует необходимость учёта термоциклических напряжений, что существенно упрощает задачу расчёта возникающих в процессе резания напряжений.

При нагружении сосредоточенной нагрузкой упругого клина, из изотропного однородного материала имеет место простое радиальное распределение напряжений [6].

Для режущего инструмента это условие ($\sigma_{\text{экр}}$ равно $\sigma_{1\text{max}}$, а $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$) справедливо на передней поверхности за пределами зоны контакта со стружкой.

Практически единственным критиком метода Бетанели А.И. был Лоладзе Т.Н. – «Расчетная схема, основанная на замене контактных нагрузок сосредоточенной силой, приложенной к вершине режущего клина, не позволяет определить месторасположение опасных точек, так как в принятом допущении на режущей кромке, когда $r = 0$, то всегда имеем $\sigma_r = \infty$. Поэтому полученное выражение не отражает реальной картины распределения напряжений в режущей части инструмента и не пригодно для решения поставленной задачи» [2].

Но ведь Бетанели А.И. не предлагал свою формулу для решения задачи расчёта напряжений вблизи вершины, а, в соответствии с принятым им принципом Сен-Венана, его метод справедлив только в области режущей части инструмента не ближе двух длин контакта.

Поэтому, метод Бетанели А.И. можно считать наиболее приемлемым для расчёта величины напряжений возникающей на передней поверхности за пределами контактной зоны.

Для расчётов напряжений в опасной зоне для свободного резания им предложена формула [6]:

$$\sigma_1 = \frac{2P}{br} \left(\frac{\sin \frac{\beta}{2} \sin \left[v_0 - \left(\frac{\beta}{2} + \gamma \right) \right]}{\beta - \sin \beta} - \frac{\cos \frac{\beta}{2} \cos \left[v_0 - \left(\frac{\beta}{2} + \gamma \right) \right]}{\beta + \sin \beta} \right) \quad (1)$$

где P – результирующая сила резания, b – ширина среза, r – расстояние от вершины до расчётной точки передней поверхности; γ – передний угол; β – угол заострения клина; v_0 – угол приложения результирующей силы резания P , где $v_0 = \text{argtg} \frac{P_z}{P_y}$.

Преобразование формулы Бетанели А.И. В исследованиях, выполненных в лаборатории резания Донецкого физико-технического института АН УССР [13], предложено преобразование формулы Бетанели А.И. в виде:

$$\sigma_1 = \frac{K_z P_z - K_y P_y}{br} \quad (2)$$

где K_z , K_y – коэффициенты; P_z , P_y – составляющие силы резания; b – ширина среза; r – расстояние от вершины до расчётной точки передней поверхности.

Коэффициенты K_z , K_y определяются по формулам:

$$K_z = 2 \left[\frac{\sin \frac{\beta}{2}}{\beta - \sin \beta} \cos \left(\frac{\beta}{2} + \gamma \right) - \frac{\cos \frac{\beta}{2}}{\beta + \sin \beta} \sin \left(\frac{\beta}{2} + \gamma \right) \right] \quad (3)$$

$$K_y = 2 \left[\frac{\sin \frac{\beta}{2}}{\beta - \sin \beta} \sin \left(\frac{\beta}{2} + \gamma \right) - \frac{\cos \frac{\beta}{2}}{\beta + \sin \beta} \cos \left(\frac{\beta}{2} + \gamma \right) \right] \quad (4)$$

где β – угол заострения; γ – передний угол.

Как видно из формул 3, 4, коэффициенты K_z и K_y постоянны при заданной геометрии клина. Расчётные значения коэффициентов K_z и K_y в зависимости от переднего угла γ (от 20° до -10°) и заднего угла α (от 2° до 10°). приведены в таблице 1.

Таблица 1

Расчётные значения коэффициентов K_z и K_y в зависимости от переднего угла γ и заднего угла α режущего клина

		Передний угол γ , град													
		20	15	10	8	6	4	2	0	-2	-4	-6	-8	-10	
Задний угол α , град	2	K_z	1,84	1,72	1,62	1,58	1,54	1,51	1,47	1,44	1,41	1,38	1,36	1,33	1,30
		K_y	3,86	3,32	2,87	2,71	2,56	2,43	2,30	2,18	2,07	1,96	1,86	1,77	1,68
	4	K_z	2,04	1,89	1,76	1,72	1,67	1,63	1,59	1,55	1,52	1,48	1,45	1,42	1,39
		K_y	4,05	3,46	2,98	2,81	2,65	2,51	2,37	2,25	2,13	2,02	1,91	1,81	1,72
	6	K_z	2,25	2,07	1,92	1,86	1,81	1,76	1,72	1,67	1,63	1,59	1,55	1,52	1,48
		K_y	4,24	3,61	3,09	2,92	2,75	2,59	2,45	2,32	2,19	2,07	1,96	1,86	1,76
	8	K_z	2,49	2,27	2,10	2,03	1,96	1,91	1,85	1,80	1,75	1,71	1,66	1,62	1,56
		K_y	4,46	3,77	3,21	3,03	2,85	2,68	2,53	2,39	2,26	2,13	2,02	1,91	1,80
	10	K_z	2,75	2,49	2,28	2,21	2,13	2,06	2,00	1,94	1,88	1,83	1,78	1,71	1,69
		K_y	4,68	3,94	3,35	3,14	2,95	2,78	2,62	2,46	2,33	2,19	2,07	1,95	1,85

Обратим внимание, что при равных величинах составляющей силы P_z , чем больше составляющая сила P_y , тем меньше уровень напряжения и наоборот. Это указывает на большее влияние составляющей силы P_y на уровень возникающих напряжений, что не учитывалось многими исследователями.

Наличие коэффициентов существенно упрощает расчёты возникающих в опасной зоне напряжений по формуле 2, а исходные для расчётов данные по величинам составляющих P_z и P_y при разных условиях резания могут быть взяты из известных источников.

При наличии в исходных данных 3-х составляющих силы резания - P_z , P_x и P_y , (несвободное резание) для расчётов с применением формулы 2 необходимо вместо P_y в расчётную формулу подставить величину горизонтальной составляющей силы резания P_{xy} :

$$P_{xy} = \sqrt{P_x^2 + P_y^2},$$

где P_x , P_y – составляющие силы резания.

Такой приём правомерен, поскольку при этом рассматриваются напряжения в клине по сечению в плоскости «Z - XY», а в ряде работ допускается применение закономерностей условий свободного резания к более общему случаю резания [2].

Определение оптимальных геометрических параметров режущего клина. Остафьев В.А. в работе [7] указывал, что «...наиболее благоприятные прочностные условия создаются, когда передняя грань совпадает с нейтральной линией. Эти идеальные условия получить трудно, так как изменение геометрии режущей части связано с потерей её износостойкости, однако приблизиться к ним путём выбора соответствующих геометрических параметров можно». Формула (2) позволяет определить эти параметры.

Приравняв числитель преобразованной формулы Бетанели А.И. к нулю, получаем условие, при котором на передней поверхности режущего клина возникают «нулевые» напряжения (т.е. нейтральная линия совпадает с передней поверхностью клина):

$$K_z P_z - K_y P_y = 0 \text{ или } K_z P_z = K_y P_y \text{ откуда } \frac{P_y}{P_z} = \frac{K_z}{K_y} \quad (5)$$

Это условие выполняется по всей передней поверхности за пределами контактной зоны и не зависит от величин составляющих силы резания, а зависит только от их соотношения (т.е. направления действия силы резания).

Обозначив отношение $\varepsilon_{фак.} = \frac{P_y}{P_z}$, а $\varepsilon_0 = \frac{K_z}{K_y}$ получим следующие условия:

– если $\varepsilon_{фак.}$ меньше ε_0 то в режущем клине существуют зоны как растягивающих так и сжимающих напряжений, разделённые нейтральной линией;

– если $\varepsilon_{фак.}$ равно ε_0 то нейтральная линия совпадает с передней поверхностью, в остальной части клина – сжимающие напряжения.

– если $\varepsilon_{фак.}$ больше ε_0 то в режущем клине возникают только сжимающие напряжения.

Как показано выше, коэффициенты K_z, K_y постоянны при заданных углах режущего клина.

Поэтому величина их отношения постоянна и ее значения, рассчитанные для каждого сочетания переднего и заднего углов режущего клина при которых нейтральная линия совпадает с передней поверхностью режущего инструмента, а напряжения вне зоны контакта равны нулю, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Значения отношения $\varepsilon_{фак.} = \frac{P_y}{P_z}$, при которых нейтральная линия совпадает с передней поверхностью режущего инструмента, а напряжения вне зоны контакта равны нулю

		Передний угол γ , град												
		20	15	10	8	6	4	2	0	-2	-4	-6	-8	-10
Задний угол α , град	2	0,48	0,52	0,56	0,58	0,60	0,62	0,64	0,66	0,68	0,71	0,73	0,75	0,78
	4	0,50	0,55	0,59	0,61	0,63	0,65	0,67	0,69	0,71	0,74	0,76	0,78	0,81
	6	0,53	0,57	0,62	0,64	0,66	0,68	0,70	0,72	0,74	0,77	0,79	0,82	0,84
	8	0,56	0,60	0,65	0,67	0,69	0,71	0,73	0,75	0,78	0,80	0,82	0,85	0,86
	10	0,59	0,63	0,68	0,70	0,72	0,74	0,76	0,79	0,81	0,83	0,86	0,87	0,91

Условия эксплуатации режущего инструмента по предложенному критерию прочности при «нулевых» напряжениях на его передней поверхности определяется тем, что:

– гарантировано отсутствие растягивающих напряжений в режущем клине при минимально возможных (для данных условий резания) величинах силы резания.

– поскольку методы повышения прочности режущей части инструмента вызывают значительный рост сил резания, то превышение оптимальной величины геометрических параметров режущего клина вызывает нежелательное повышение нагрузок, а прочность режущей части инструмента при этом будет снижаться.

Предложенный метод определения параметров, обеспечивающих нулевые напряжения на передней поверхности, заключается в создании таких условий резания, при которых $\varepsilon_{фак.} = \varepsilon_0$.

Этих условий можно достичь, или максимально приблизиться к ним, путем:

– изменения величины переднего и (или) заднего углов режущего клина;

– при заданных величинах углов режущего клина – округлением режущей кромки или нанесением фаски с отрицательным передним углом.

В работе [1] указано на наличие максимума прочности при увеличении радиуса округления режущей кромки.

До определённой величины радиуса прочность инструмента возрастает в 1,5...2 раза и становится максимальной. Дальнейшее увеличение округления снижает прочность из-за роста силы резания и средних контактных напряжений.

Очевидно, что определение этого важного, для практических целей, геометрического параметра режущей части – непростая задача, но расчёты по предлагаемой методике, при наличии данных о зависимости значений величины составляющих силы резания от радиуса округления, позволяют определить эту оптимальную величину радиуса округления режущей кромки [13, 14].

Для расчёта напряжений, возникающих в опасной зоне режущей части лезвийного режущего инструмента предложены два варианта определения значения «нулевых» геометрических параметров режущего клина инструмента:

- по точке пересечения A расчётной линии напряжений $\sigma_{расч}$ с горизонтальной линией $\sigma = 0$. (Рис.3, а);

- по точке пересечения линий точка B (Рис.3.б) «расчётное отношение» $\varepsilon_{фак.} = \frac{P_y}{P_z}$ (сплошная) и

значение $\varepsilon_0 = \frac{K_z}{K_y}$ из таблицы 2 (штрихпунктирная линия).

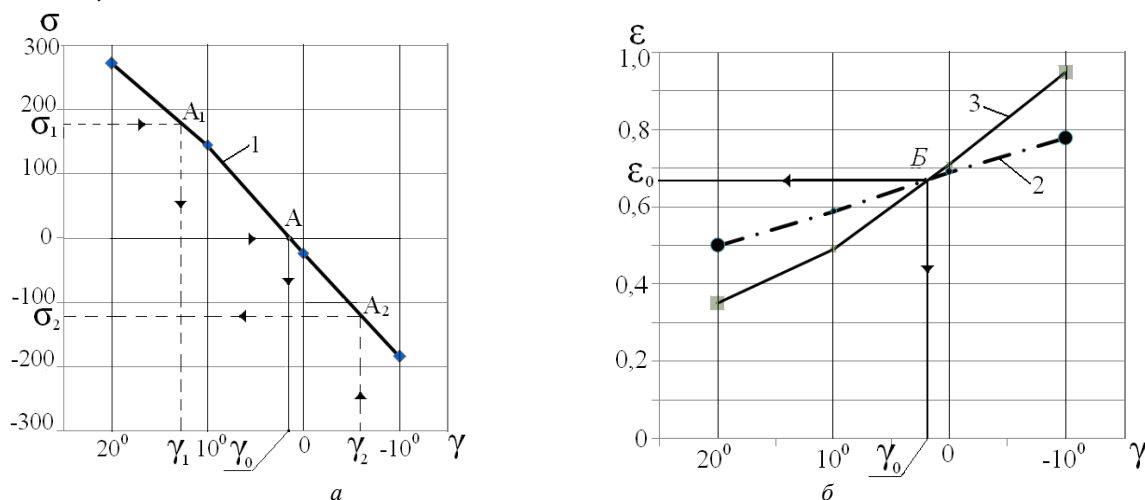


Рис. 3. Номограмма определения оптимального значения геометрических параметров режущего клина, γ_0 по зависимостям $\sigma_{расч}$ (а), ε_0 и $\varepsilon_{фак.}$ (б), соответственно; $\sigma_{расч}$ (1); отношение $\varepsilon_{фак.} = \frac{P_y}{P_z}$ (2) и значение $\varepsilon_0 = \frac{K_z}{K_y}$ (3)

Применение номограммы (Рис. 3, а): по величине напряжений σ_1 можно определить соответствующую величину переднего угла γ_1 . Для этого из заданной точки величины напряжений σ_1 проводим горизонтальную линию до пересечения с графиком напряжений (точка A_1), из которой проводим вертикальную линию до пересечения с ординатой и получаем значение угла γ_1 .

Если необходимо по величине переднего угла γ_2 определить соответствующую величину напряжений σ_2 , то из заданной точки γ_2 проводим вертикаль до пересечения с графиком напряжений (точка A_2). Затем из этой точки проводим горизонталь до пересечения с осью абсцисс. Полученная точка σ_2 будет искомой величиной напряжений соответствующей переднему углу γ_2

Расчёты оптимальной величины переднего угла γ_0 :

– по первому варианту:

1. Из источника исходных данных выбираются значения величин составляющих силы резания в исследуемом диапазоне переменного параметра (углы режущего клина, радиус округления кромки, углы и ширина упрочняющей фаски или др.). При 3-х составляющих силы - P_z , P_x и P_y , рассчитывается значение горизонтальной составляющей P_x , величина которой подставляется в расчётную формулу (2) вместо P_y .

2. По величинам заданных углов клина, γ и α , из таблицы 1 выбираются соответствующие значения коэффициентов K_z и K_y .

3. Определяется значение расстояния r от вершины до расчётной точки:

- при наличии в исходных данных длины контактной зоны l_k мм. принимаем величину r , равную $2l_k$.

- при отсутствии таких данных в расчётах используем значение толщины среза a , мм.. Из рисунка 2, в видно, что область максимальных значений растягивающих напряжений на передней поверхности режущего клина довольно широка (от 1,75 до 3,25) l_k длины контакта. Поэтому, в сравнительных расчётах напряжений в опасной зоне принята зависимость $r = 5a$, что, как показывают результаты проведенных расчётов, приемлемо.

4. Ширина среза b выбирается из исходных данных условий резания.

5. Выбранные величины составляющих силы резания, значения K_z и K_y , а также величины r и b подставляются в формулу (2) и проводится расчёт уровней возникающих напряжений в заданной точке передней поверхности.

6. По результатам расчётов (п. 5) строится зависимость уровня напряжений от величины исследуемого переменного параметра $\sigma_{расч}$ (Рис. 3, а, линия 1).

Если в диапазоне изменения параметра линия напряжений $\sigma_{расч}$ пересекает горизонталь $\sigma = 0$, то соответствующее значение переменного параметра (по критерию «нулевых» напряжений) и есть искомая оптимальная величина (Рис. 3.а, точка A). Если же линия $\sigma_{расч}$ не пересекает горизонталь $\sigma = 0$, то в исследуемом диапазоне переменного параметра значения, в котором напряжения равны нулю, не существует (есть только напряжения растяжения);

– по второму варианту:

1. Аналогично первому варианту, из источника исходных данных нужно выбирать значения величин составляющих силы резания в диапазоне переменного параметра. При наличии 3-х составляющих, рассчитать величину P_{xy} .

2. Выполнить расчёты зависимости $\varepsilon_{фак.} = \frac{P_y}{P_z}$ (или, при 3-х составляющих, P_{xy}/P_z) в исследуемом диапазоне. По этим данным построить графики зависимостей (Рис. 3, б, линия 2).

3. Из таблицы 2, в соответствии с величинами заданных углов клина, γ и α , выбрать значения $\varepsilon_0 = \frac{K_z}{K_y}$. По этим значениям также построить графики (Рис.3, б, линия 3). При постоянных величинах углов γ и α (радиус округления, фаска и др.) этот график – горизонталь от табличного значения $\varepsilon_0 = \frac{K_z}{K_y}$. При переменных углах

клина – линия по соответствующим значениям, выбранным из таблицы 2.

4. Совместить графики, построенные по условиям п.2 и п. 3. Если эти графики пересекаются, то, соответствующее точке пересечения B (Рис. 3, б) значение переменного параметра (по вертикали – стрелка вниз), как и в первом варианте, - оптимальная величина угла γ_0 (по критерию «нулевых» напряжений). По горизонтали от точки B , проводим стрелку влево и определяем условие « $\varepsilon_0 = \varepsilon_{фак}$ » (совпадение нейтральной линии с передней поверхностью инструмента).

При отсутствии такого пересечения в исследуемом диапазоне переменного параметра значения, в котором напряжения равны нулю, не существует.

Второй вариант значительно проще, но он позволяет определить только оптимальное значение исследуемого параметра по критерию «нулевых» напряжений. Если же поставлена более широкая задача (определение характера напряжений или диапазона изменения параметра при заданных величинах допустимых напряжений), то необходимо применить первый вариант расчёта.

В результате расчетов по обоим вариантам имеем абсолютное совпадение величин оптимальных параметров (Рис. 3, а и рис 3, б - точки A и B), так как значения величин в таблице 1 и таблице 2 рассчитаны по одной и той же формуле.

Пример расчёта по предложенному методу. Для иллюстрации данного метода приведём результаты расчетов, исходные данные взяты из работы [11].

На рисунке 4, а представлены зависимости изменения величин составляющих силы резания P_z , P_x и P_y при точении стали 40 и изменении переднего угла γ от 20° до -10° .

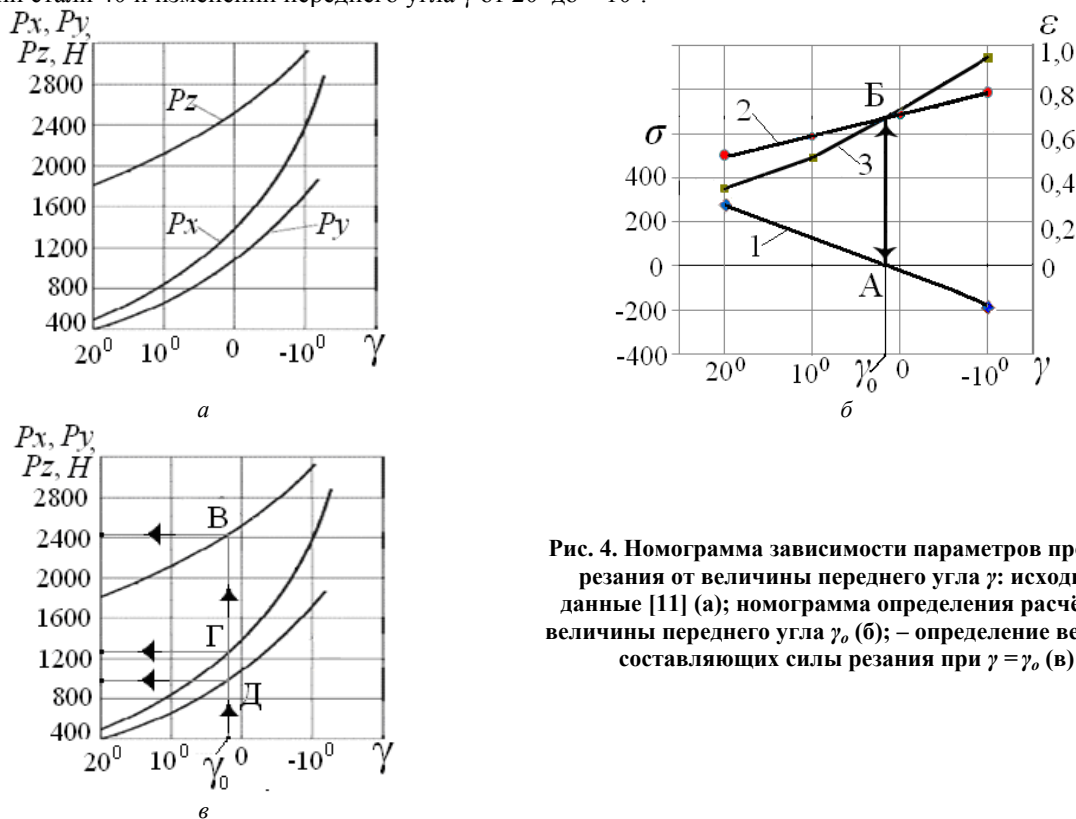


Рис. 4. Номограмма зависимости параметров процесса резания от величины переднего угла γ : исходные данные [11] (а); номограмма определения расчётной величины переднего угла γ_0 (б); – определение величин составляющих силы резания при $\gamma = \gamma_0$ (в)

Из исходных данных (Рис.4, а) видно, что при уменьшении γ с 20^0 до -10^0 резко возрастают величины составляющих сил резания.

При анализе этих зависимостей возникают вопросы:

- как это сказывается на прочности режущей части инструмента; – при каких значениях переднего угла γ растягивающие напряжения в опасной зоне переходят в сжимающие ($\sigma = 0$);
- какие величины составляющих силы резания соответствуют этому оптимальному значению переднего угла $\gamma = \gamma_0$?

Для ответа на эти вопросы выполним расчёты напряжений по предложенной методике.

Результаты выполненных расчётов уровня напряжений в опасной зоне режущего клина инструмента представлены в таблице 3.

Таблица 3

Изменение параметров резания при уменьшении угла γ

№	Передний угол, γ	20^0	10^0	0	-10^0
1	Составляющая силы резания P_z , Н	1810	2150	2500	3120
2	Составляющая силы резания P_{xy} , Н	640	1050	1770	2950
3	Отношение P_{xy}/P_z	0,35	0,49	0,71	0,95
4	Величина ε_0 (табл.2)	0,50	0,59	0,69	0,81
5	Угол действия силы резания, ω	$19,3^0$	$26,2^0$	$35,4^0$	$43,5^0$
6	равнодействующая сила P , Н	1920	2393	3063	4294
7	Напряжения σ (при $\alpha = 4^0$)	273	145	-24	-184

При изменении переднего угла γ с 20^0 до 2^0 (γ_0) относительный уровень напряжений в режущем клине снижается с 273 ед. при до 0, а $\varepsilon_{фак}$ изменяется от 0,50 до оптимального значения $\varepsilon_{фак} = 0,67$ – точки А и В номограммы (Рис. 4, б), а при дальнейшем изменении переднего угла γ до -10^0 происходит резкий рост величин составляющих силы резания (Рис. 4, в) и сжимающих напряжений в опасной точке режущего клина (с 0 до относительного уровня – 184 ед.), что может привести к поломке инструмента от действия предельных напряжений сжатия.

Вернувшись к исходным зависимостям сил (Рис.4, а) при $\gamma_0 = +2^0$ можно определить величины составляющих сил резания (Рис.4, в) P_z , (точка В), P_x (Г) и P_y , (Д), которые соответствуют расчётной оптимальной величине угла γ_0 .

Из таблицы 3 видно, что при переднем угле $\gamma = 20^0$ равнодействующая силы резания $P = 1920$ Н, направленная под углом действия $\omega = 19,3^0$ вызывает повышенный уровень растягивающих напряжений ($\sigma_{усл.} = 273$ усл. ед.).

При $\gamma = 0^0$ равнодействующая силы резания $P = 3063$ Н, направленная под углом действия $\omega = 35,4^0$, создает относительный уровень сжимающих напряжений $\sigma_{усл.} = -24$ усл. ед.

При $\gamma = -10^0$ равнодействующая силы резания $P = 4294$ Н, направленная под углом действия $\omega = 43,5^0$, создаёт относительный уровень сжимающих напряжений $\sigma_{усл.} = -184$ усл. ед.

Представленные результаты показывают, что при уменьшении угла γ с 20^0 до -10^0 уровень напряжений в опасной зоне передней поверхности снижается, несмотря на рост равнодействующей силы резания P в 2,24 раза, до отрицательных значений, в основном, из-за изменения угла действия этой силы ω . Угол заострения клина при этом увеличивается на 30^0 (с 66^0 до 96^0).

Выводы

1. Предложена методика расчёта напряжений, возникающих в опасной зоне режущей части лезвийного режущего инструмента
2. Приведено преобразование формулы Бетанели А.И. для расчёта уровня напряжений в опасной зоне режущего инструмента, как показателя прочности.
3. Определены условия расчёта оптимальных геометрических параметров режущей части инструмента по критерию «нулевого» уровня напряжений на передней поверхности.
4. Методика позволяет установить степень влияния различных геометрических параметров режущего клина (углы клина и форма режущей кромки) на уровни напряжений, возникающих в опасной зоне режущего инструмента.

Анотація. Проведено аналіз робіт з міцності лезового інструмента і запропонована методика розрахунку напружень, що виникають в небезпечній зоні різальної частини інструмента, за перетвореною формулою Бетанелі А.І.

Встановлено основні фактори, що визначають міцність різальної частини лезового інструменту і запропонований метод побудови номограм для визначення геометричних параметрів різальної частини інструмента за критерієм «нулевого» рівня напружень на його передній поверхні.

Наведено приклад розрахунку напружень в різальної частини лезвийного інструменту та визначено оптимальні значення його переднього кута за критерієм міцності.

Ключові слова. лезвий різальний інструмент, геометричні параметри сила різання, напруження, міцність

Abstract. It's carried out the analysis of works on durability of the blade tool and it's offered the methodology of tension calculation, arising in a dangerous area of the cutting part of the tool on the transformed Betaneli A. I. formula. The major factors determining durability of the cutting part of the blade tool are established and it's offered the method of nomograms creation for determination of geometrical parameters of the cutting part of the tool by criterion of tension "zero" level on a front surface.

It's given the example of tension calculation in the cutting part of the blade tool and optimum values its forward angle are determined by criterion of durability.

Keywords. the blade cutting tool, geometrical parameters of cutting force, tension, durability

Библиографический список использованной литературы

1. Хаєт, Г.Л. Прочність режущого інструмента. / Г.Л. Хаєт. – М.: Машиностроєння, 1975. – 168 с.
2. Лолодзе Т.Н. Прочність і износоустійкість режущого інструмента М.: Машиностроєння, 1982. — 320 с.
3. Вульф А.М. Резание металлов Изд. 2-е. - Л.: «Машиностроєння» (Ленингр. отд-ние), 1973. - 496 с.
4. Андреев Г.С. Удар при прерывистом резании металлов. "Вестник машиностроєння". 1971. - №3. - С.65-68.
5. Остафьев В.А., Антонюк В.С., Выслоух С.П. и др. Физические основы процесса резания под редакцией д.т.н. Остафьева В.А. – Киев: изд. «Вища школа», 1976. - 136 с.
6. Бетанели А.И. Прочность и надежность режущего инструмента [Текст] : научное издание / А. И. Бетанели. - Тбилиси : Сабчота Сакартвело, 1973. – 304 с.
7. Остафьев В.А. Расчет динамической прочности режущего инструмента. М.: Машиностроєння. 1979. 168 с.
8. Высокоскоростная фотосъемка начального процесса резания при обработке. / Дж. Тэ // Констр. и техн. Маш.: Тр. Амер. Общ. Инж.-механиков. М.: Мир, 1977.: №1. С.213–219.
9. Лолодзе Т.Н., Ткемаладзе Г.Н., Тотчиев Ф.Г. Определение напряжений в режущей части инструмента при переходных процессах. – В кн.: Надежность режущего инструмента. Вып. 2, Киев-Донецк. 1975, с. 82-86.
10. Остафьев В.А., Антонюк В.С., Тымчик Г.С. Диагностика процесса металлообработки - К.: Техніка. 1991. - 152 с.
11. Основы теории резания материалов: учебник [для высш. учебн. заведений] / Мазур Н.П., Внуков Ю.Н., Грабченко А.И. и др. ; под общ. ред. Н.П. Мазура и А.И. Грабченко. – 2-е изд., перераб. и дополн. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2013. – 534 с.
12. Криворучко Д.В. Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы: монография/ Д.В.Криворучко, В.А. Залого; под общ. ред. В.А. Залого. – Сумы: Университетская книга, 2012. – 496 с.
13. Ильченко Н.Я., Ковтуненко В.В., Петрусенко Л.А., Об особенностях напряженного состояния режущей части инструмента при прерывистом резании // Резание и инструмент. Харьков, 1979. - №22. - С.72-77.
14. Выслоух С.П. Інформаційні технології в задачах технологічної підготовки приладо- та машинобудівного виробництва: моногр. / С.П. Вислоух. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 488 с.

References

1. Haet, G.L. (1975), Prochnost' rezhushhego instrumenta [The durability of the cutting tool], *Mashinostroenie*, Moscow, Russia.
2. Loladze, T.N. (1982), Prochnost' i iznosostojkost' rezhushhego instrumenta [The durability and wear resistance of the cutting tool], *Mashinostroenie*, Moscow, Russia.
3. Vul'f, A.M. (1973), Rezanie metallov [Metal cutting], *Mashinostroenie*, Leningrad, Russia.
4. Andreev, G.S. (1971), Udar pri preryvistom rezanii metallov [Beat in intermittent cutting of metals], *Vestnik mashinostroenija*, No 3, Moscow, Russia.
5. Ostaf'ev, V.A., Antonyuk, V.S., Vyslouh, S.P. end dr. (1976), Fizicheskie osnovy processa rezanija [Physical bases of the cutting process], Ostaf'ev V.A. (ed) *Vishha shkola*, Kiev, Ukraine.
6. Betaneli, A.I. (1973), Prochnost' i nadezhnost' rezhushhego instrumenta [Durability and reliability of the cutting tool], *Sabchota Sakartvelo*, Tbilisi, Georgia.
7. Ostaf'ev, V.A. (1976), Raschet dinamicheskoy prochnosti rezhushhego instrumenta. [Calculation of the dynamic durability of the cutting tool], *Mashinostroenie*, Moscow, Russia.
8. The, J. H. L. (1977), High-Speed Films of the Incipient Cutting Process in Machining at Conventional Speeds, *Journal of engineering for industry, ASME*, No 1.
9. Loladze, T.N., Tkemaladze, G.N. and Totchiev, F.G. (1975), Opredelenie naprjazhenij v rezhushhej chasti instrumenta pri perehodnyh procesah. [Determination of tension in the cutting part of the tool during transient processes.], *Nadezhnost' rezhushhego instrumenta*, No 2, Kiev-Donetsk, Ukraine.
10. Ostaf'ev, V.A., Antonyuk, V.S. and Tymchik, G.S. (1991), Diagnostika processa metallobrabotki [Diagnosis of metalworking process], Kyiv, Tehnika, Ukraine.
11. Mazur, N.P., Vnukov, Ju.N., Grabchenko, A.I. end dr. (2013), Osnovy teorii rezanija materialov [Foundations theory of cutting materials], Mazur, N.P. and A.I. Grabchenko (ed), 2 nd(eg), *NTU «HPI»*, Har'kov, Ukraine.
12. Krivoruchko, D.V. and Zaloga, V.A. (2012), Modelirovanie processov rezanija metodom konechnyh jelementov: metodologicheskie osnovy [Simulation of the cutting process using finite element method: methodological bases], Zaloga, V.A. (ed), *Universitetskaja kniga*, Sumy, Ukraine.
13. Il'chenko, N.Ja., Kovtunencko, V.V. and Petrusenko, L.A. (1979), Ob osobennostjah naprjazhennogo sostojanija rezhushhej chasti instrumenta pri preryvistom rezanii [On peculiarities of the reliability state of the cutting part of the tool during intermittent cutting], *Rezanie i instrument*, No 22, Har'kov, Ukraine.
14. Vyslouh, S.P. (2011), Informacijni tehnologii v zadachah tehnologichnoї pidgotovki prilado- ta mashinobudivnogo virobnictva [Information technology in the problems of technological preparation of instrument making and engineering production], *NTUU «KPI»*, Kyiv, Ukraine.

Подана до редакції 18.09.2016