© С.А. Шемякин, 2005

УДК 624.139.009.51.001.5

*С.А. Шемякин*

# *РАЗРУШЕНИЕ МЕРЗЛЫХ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ И КРУПНООБЛОМОЧНЫХ ПОРОД РЕЗАНИЕМ (РЫХЛЕНИЕМ)*

**Семинар № 12**

Теоретическому и экспериментальному исследованию сопротивлений резанию-рыхлению мерзлых пород посвящено ряд работ [1, 2, 3, 4], однако практически не исследован вопрос резания мелкозернистых связных пород при температурах -1…-5° С. Недостаточно изучен вопрос определения сопротивления мерзлых пород с крупнообломочными включениями. Расчет по существующим аналитическим теориям, основанным на рассмотрении физических моделей процесса резания мерзлых пород во всех случаях дает результат далеко не совпадающий с результатами экспериментов. Расхождения могут достигать 50…100%. В данной работе рассмотрены схемы действия сил и напряжений при предельном равновесии отделяемых элементов стружки в процессе резания мерзлых пород, которые получены на основе наблюдений и измерений формы стружки во время экспериментальных работ.

Стружкообразование связных пород (суглинок, глина) близких по своему состоянию к талым (например суглинок при числе ударов динамического плотномера ДорНИИ 35 ≤ С ≤ 50, влажностью $\omega$ =18…20 % и температуре -1…-5°С) имеет некоторое качественное отличие от стружкообразования хрупких мерзлых пород. Это отличие заключается в том, что при углах резания 30…50° часть уплотненного ядра перед движущимся режущим профилем, из-за отсутствия необходимого сцепления с элементом образующейся стружки, продвигается вверх к открытой поверхности, выходит на дневную поверхность и отделяется от массива за один или два раза небольшими гладкими конусообразными телами в виде промежуточных элементов стружки, прежде чем наступит более крупное отделение стружки. Отделение стружки в большинстве случаев происходит путем взламывания породы уплотненным ядром, всегда имеющем место на лобовой поверхности режущего инструмента, и дробления чаще на две отдельные части с разрывом элемента стружки вдоль направления движения зуба и реже при сотовом способе резания на ряд отдельных кусков. Далее цикл повторяется, но наибольшее сопротивление породы всегда бывает в заключительной стадии цикла, также как и при резании хрупких мерзлых пород.

При определении сопротивления резанию необходимо учитывать дополнительные усилия на разрыв породы по площади фигуры, ограниченной точками П, С, А, О, $O_1$ (рис. 1). Если допустить, что уплотненное ядро перед лобовой поверхностью зуба имеет в сечении полукруглую форму, то проинтегрировав напряжения $\sigma_{см}$ по поверхности уплотненного ядра получим равнодействующие R по обе стороны продольного разрыва элемента стружки. Разложив каждую

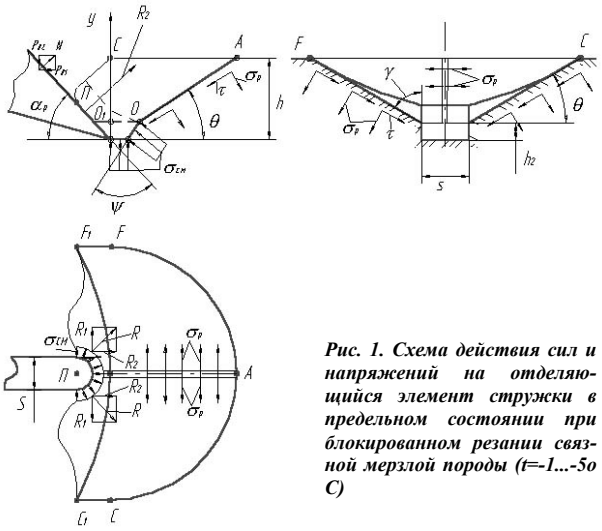


***Рис. 1. Схема действия сил и напряжений на отделяющийся элемент стружки в предельном состоянии при блокированном резании связной мерзлой породы (t=-1...-5o C)***

R на составляющие $R_1$ и $R_2$, соответственно вдоль и поперек направления движения зуба, можно записать, что $2R_1 = \sigma_p \cdot S_{ПСАОО_1}$. Однако $R_1 = R_2$ и тогда $2R_2 = \sigma_p S_{ПСАОО_1}$.

После интегрирования $\sigma_p$ и $\tau$ по поверхности отделения элемента стружки и учета $\sigma_{см}$ в зоне уплотненного ядра и на площадке затупления формулы для определения максимального сопротивления блокированному резанию мерзлых пород при t=-1...-5 оС примут вид:

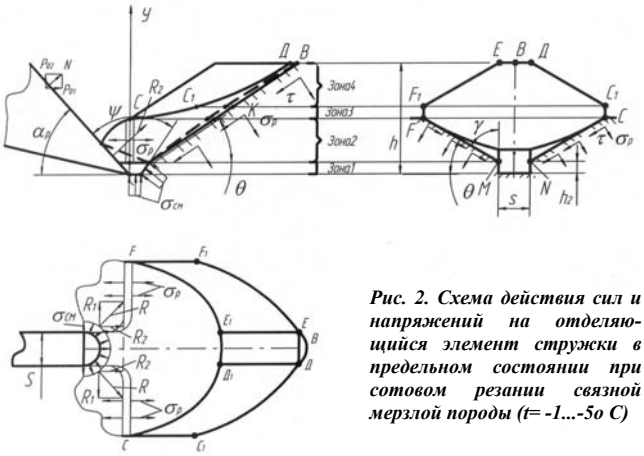


***Рис. 2. Схема действия сил и напряжений на отделяющийся элемент стружки в предельном состоянии при сотовом резании связной мерзлой породы (t= -1...-5о С)***

$$P_{01} = \sigma_{см}\left[sh_2 + \frac{\xi_1 h_2^2 tg\varphi_2 \sin(2\alpha_p + \psi)}{\sin(\alpha_p + \psi)} + \frac{\xi_1 s^2 tg\varphi_2}{8} + \right.$$

$$\left. + \frac{\pi s h_2 tg\varphi_2 ctg(\alpha_p + \psi)}{2}\right] + \left(\tau - \sigma_p tg\theta\right)\left[\frac{h - h_2}{tg^2\theta}\left(stg\theta + h - h_2\right)\right] +$$

$$+ \frac{\sigma_{см} bs \sin(\delta_1 + \mu)}{\cos\mu} + \sigma_p \cos\theta \times \left\{\frac{(h - h_2)^2}{2tg\theta} + (h - h_2)\left[\frac{s}{2} + h_2 ctg\left(\alpha_p + \psi\right)\right] + \right.$$

$$\left. \times \left\{\frac{h^2 ctg^2\alpha_p ctg\theta}{2(ctg^2\theta - ctg^2\alpha_p)} + \frac{h^2 ctg^2\theta ctg\alpha_p}{2\left(ctg^2\theta - ctg^2\alpha_p\right)} - \frac{h_2}{2tg\alpha_p}\right\}\right. .$$

Аналогично может быть определена и нормальная составляющая сопротивления резанию $P_{02}$.

При сотовом способе резания трещины разрыва элемента стружки идут по линиям наименьшего сопротивления, т.е. в стороны перпендикулярные направлению движения зуба (рис. 2). В этом случае при определении сопротивления резанию необходимо учитывать дополнительные усилия на разрыв породы по площади фигуры, ограниченной точками F, C, N, M. Тогда аналогично блокированному резанию $2R_2 = \sigma_p S_{FCNM}$. Формула для определения максимальной касательной составляющей сопротивления сотовому резанию мерзлых связных пород при $t = -1^0 \ldots -5^0$ С примет вид:

$$P'_{01} = \sigma'_{см}\left[sh_2 + \frac{bs\sin(\delta_1 + \mu)}{\cos\mu}\right] + \frac{\left(\tau - \sigma_p tg\theta\right)}{tg^2\theta}\left\{\left[\frac{h}{2}\left(stg\theta + \frac{h}{2}\right) + \right.\right.$$

$$\left. + \frac{2h_2^2\left(stg\theta + h - h_2\right)}{3\left(stg\theta + h\right)}\right] + \left[\frac{\left(stg\theta + 2h - 2h_2\right)^2 - \left(stg\theta + h\right)^2}{4}\right]\left[\frac{stg\theta + h - 2h_2}{3{,}5\left(stg\theta + h\right)} + \right.$$

$$\left.\left. + \frac{2{,}5stg\theta}{3{,}5\left(stg\theta + 2h - 2h_2\right)}\right]\right\} + \sigma_p\left(\frac{h}{2} - h_2\right)\left[\frac{stg\theta + \frac{h}{2} - h_2}{tg\theta}\right]\cos\theta$$

Мерзлые породы с крупнообломочными включениями целесообразно рассматривать как совокупность двух систем: крупные минеральные включения (> 2 мм) и заполняющий поры между ними льдистый мелкозернистый заполнитель (глина, суглинок и т.д.). Сопротивление разрыву мерзлых крупнообломочных пород обусловлено прочностью заполнителя, т.е. его влажностью и составом. Обычно каждый обломок покрыт тонкой пленкой льда. Контактные силы смерзания существенно зависят от суммарной поверхности и поверхности гравийно-галечной фракции.

Многочисленные эксперименты, проведенные автором в полевых и лабораторных условиях на передвижном стенде, свидетельствуют о том, что если включение располагается внутри элемента стружки в зоне 3 (рис. 3) при блокированном или при сотовом способах резания, то оно не оказывает практически влияния на сопротивление резанию. При расположении включения на грани поверхности разрыва элемента стружки сопротивление резанию несколько снижается из-за меньшего сцепления породы с включением по сравнению со сцеплением породы-заполнителя. При понижении уровня расположения включения в зону 1 (зона уплотненного ядра) сопротивление резанию заметно возрастает и тем быстрее, чем больше размеры включения. При расположении включения в зоне 1 оно выдавливается уплотненным ядром в зону 2. Касательная составляющая сопротивления резанию достигает максимального значения тогда, когда статический момент площади контура включения, находящегося выше уровня режущей кромки зуба, равен статическому моменту площади контура включения, находящегося ниже уровня режущей кромки. При дальнейшем понижении уровня залегания вклю-

чения отмечается резкое возрастание нормальной составляющей сопротивления ре-занию, связанное с вдавливанием включения в нижние слои породы, как штампа, с одновременным разворотом обломка в плоскости движения зуба. При движении включения перед режущей кромкой зуба впереди его в свою очередь формируется свое уплотненное ядро, размеры которого пропорциональны размеру включения. Увеличение размеров уплотненного ядра перед включением вызывает увеличение размеров отделяемых элементов стружки и соответственно дополнительное возрастание сопротивлений резанию. Рассматриваемые физические модели для определения $P_{01}^{\max}$ и $P_{02}^{\max}$ справедливы для случая, когда прочность включения больше, чем у заполнителя. При прочности включений меньше прочности заполнителя происходит их разрушение зубом, а сопротивления резанию не имеют максимальных значений. Для блокированного способа резания касательную составляющую сопротивления можно определить по зависимости, в которой учтены сопротивления в зоне 2 с заменой S на b, h2 на a/2, исключением сопротивлений, связанных с затуплением режущей кромки зуба, но с учетом сопротивлений на уплотненном ядре перед включением (рис. 3).

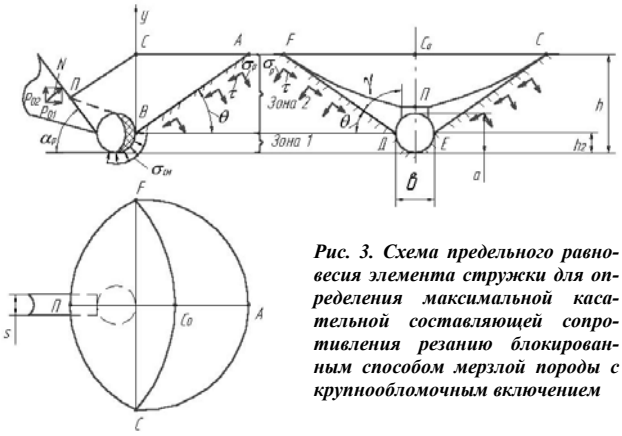


***Рис. 3. Схема предельного равновесия элемента стружки для определения максимальной касательной составляющей сопротивления резанию блокированным способом мерзлой породы с крупнообломочным включением***

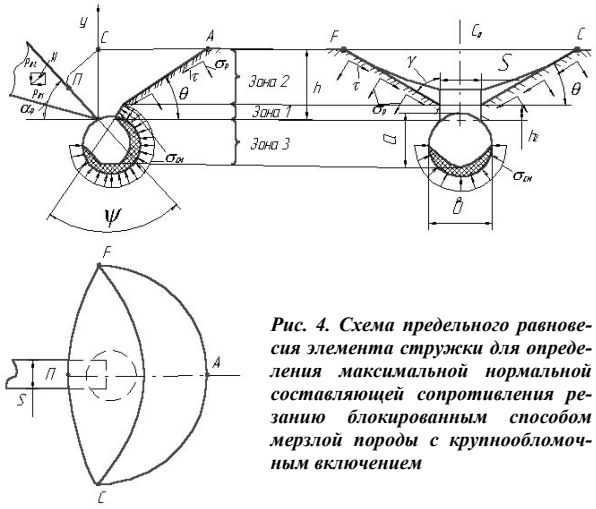


***Рис. 4. Схема предельного равновесия элемента стружки для определения максимальной нормальной составляющей сопротивления резанию блокированным способом мерзлой породы с крупнообломочным включением***

$$P_{01}^{\max} = \frac{\sigma_{см}\pi\left(\frac{b}{2}\right)^2}{3} + \left(\tau - \sigma_p tg\theta\right)\left[\frac{h-\frac{a}{2}}{tg^2\theta}\left(b\cdot tg\theta + h - \frac{a}{2}\right)\right]$$

Определение максимального значения нормальной составляющей сопротивления резанию мерзлой породы (рис. 4) имеет ряд особенностей. Во-первых, максимальное значение $P_{02}^{\max}$ возникает согласно экспериментальных данных, когда большая часть контура включения располагается ниже уровня режущей кромки зуба. В этот момент происходит додавливание включения вглубь массива преимущественно площадкой затупления зуба и в то же время продвижение включения по направлению движения зуба. Напряжения смятия возникают по поверхности уплотненного ядра перед лобовой поверхностью зуба (зона 1), а так же на ¾ поверхности шара, соответствующей поверхности уплотненного ядра перед включением при условии, что b≈a. Исключая сопротивление, связанное с затуплением зуба, можно получить зависимость для определения $P_{02}^{\max}$:

$$P_{02}^{\max} = \sigma_{см}\left[\frac{\pi\left(\frac{b}{2}\right)^2}{3} + sh_2 ctg\left(\alpha_p + \psi\right) + \frac{\pi s^2\xi_1}{8} - \frac{\pi s h_2 tg\varphi_2}{2} - \right.$$

$$\left. - \frac{\xi_1 h_2^2 \sin\left(2\alpha_p + \psi\right) tg\varphi_2}{tg\alpha_p \sin\left(\alpha_p + \psi\right)}\right] - \left(\tau tg\theta + \sigma_p\right)\left[\frac{h-h_2}{tg^2\theta}\left(stg\theta + h - h_2\right)\right].$$

Аналогично приведенной методике можно определять $P_{01}^{\max}$ и $P_{02}^{\max}$ для сотового резания мерзлых пород с крупнообломочными включениями, а так же для блокированного и сотового

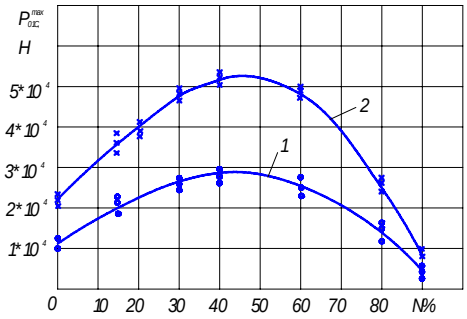


***Рис. 5. Зависимость среднемаксимальной касательной составляющей сопротивления резанию $P_{01C}^{max}$ от процентного содержания крупнообломочных включений N в породе:*** 1 – суглинок, S=4см, t=18,3см, h=12см, αр=50°, С=100, ω=18%; 2 – песок, S=4см, t=18,3см, h=12см, αр=50°, С=200, ω=16%

резания связных пород при температуре -1…-5° С.

Процентное содержание N по массе крупнообломочных включений при резании одиночным зубом оказывает существенное влияние на величину, как касательной, так и нормальной составляющих сопротивления резанию. При увеличении процентного содержания включений до 35…45% (рис. 5) происходит возрастание составляющих сопротивления резанию из-за вдавливания части включений площадкой затупления и боковыми кромками зуба в массив породы в области уплотненного ядра, а так же из-за увеличения объема уплотненного ядра, формирующегося перед включением.

Дальнейшее увеличение N выше 45–50 % приводит к уменьшению составляющих сопротивлений резанию, поскольку при большом количестве включений связующей мелкозернистой породы становится недостаточным для цементирования всех включений, происходит соприкосновение их между собой и, как результат не возникает прочная связь всего массива породы.

Математическая обработка полученных экспериментальных данных дала возможность получить регрессионную зависимость для определения среднемаксимальной касательной составляющей сопротивления резанию для блокированного и сотового способов в зависимости от процентного содержания включений в породе:

$$P_{01C}^{max} = P_{01}(0,258 + 0,09795N - 0,001075N^2)\ .$$

Указанная формула справедлива при толщинах стружки h = 2…16 см, при угле резания $\alpha_p$ = 50°, что в наибольшей степени соответствует условиям работы траншейных экскаваторов на мерзлых породах.

Необходимо отметить также хорошую сходимость расчетных значений $P_{01}^{max}$ и $P_{02}^{max}$, определяемых по формулам, с экспериментальными значениями. Расхождение в значениях не превышает 10%.

## *СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ*


1. *Зеленин А.Н., Баловнев В.И., Керов И.П.* Машины для земляных работ. – М.: Машиностроение, 1975. – С. 424.

2. *Шемякин С.А.* Определение сопротивлений резанию мерзлых грунтов сотовым способом// Строительные и дорожные машины. 2002, №4. – С. 27-31.

3. *Соколов Л.К., Осипенко Б.В., Дашевский А.Г.* Расчет сил резания мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями // Строительные и дорожные машины, 1986, №4, с. 24-26.

4. *Волков Д.П., Осипенко Б.В.* Разработка мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями дискофрезерными рабочими органами // Строительные и дорожные машины .-1988, №9, с. 3-5.


## *Коротко об авторах*


*Шемякин Станислав Аркадьевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные и дорожные машины» со специализацией «Открытые горные работы» Хабаровского государственного технического университета (ХГТУ).