

Радиус инструмента при электромонтаже методом накрутки

10, октябрь 2012

DOI: 1012.0465668

Ковалев В. Г., Ковалев С. В.

УДК 621.396.6.002.72

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

ksv.ibm@bk.ru

Электромонтаж накруткой используют для получения электрических соединений с помощью одножильных проводов, штырей-выводов и необходимых для этого устройств. Способ применяют для электрического монтажа блоков, панелей и рам электронной аппаратуры. Его достоинства по сравнению с паяными соединениями: - исключение нагрева, припоев и флюсов; - повышение надежности соединений при механических и климатических воздействиях; - ускорение процесса электрического монтажа аппаратуры; - создание условий для его автоматизации; повышенная производительность.

Соединение накруткой это контактное соединение неизолированного провода (или участка изолированного провода без изоляции) с выводом, имеющим острые кромки, при котором провод наматывается на вывод с определенным усилием. Натяжение провода при накрутке позволяет разрушить пленку оксидов или тонкую пленку изоляции на контактирующих поверхностях металлов, способствует вдавливанию острых кромок вывода в провод и образованию газонепроницаемого соединения. В этом случае оксидная плёнка или изоляция прорезается острыми кромками вывода. Концентрация напряжения в зонах контакта и среднее давление обуславливают и взаимную диффузию металлов. Соединение накруткой удовлетворяет следующим требованиям: - минимальные номинальное и переходное сопротивления; - газонепроницаемость, исключая коррозию; - электрическую стабильность во времени при механических и климатических воздействиях.

Для накрутки используют медный одножильный провод, имеющий относительное удлинение не менее 20 %. Рабочий участок провода освобождается от изоляции и облуживается. Кроме меди, используют латунь, никелевое железо и никелевую проволоку.

Большое значение в обеспечении электрической и механической стабильности соединения имеет процесс диффузии контактирующих металлов сопровождающий накрутку.

Срок службы соединения накруткой при нормальных климатических воздействиях составляет 15...20 лет.

Для накрутки применяют одножильный провод диаметром 0,17...1,2 мм. Провод большего диаметра требует увеличения усилия натяжения и более прочных выводов.

Соединение накруткой должно быть самозапирающимся, чтобы провод не мог сойти с вывода. Осесимметричные поперечные сечения - круглые или имеющие в поперечном сечении эллипс не подходят с этой точки зрения. Самозапирание обеспечивается за счёт упругих деформаций разгрузки контактирующих элементов: проводник, растягиваемый при накрутке в процессе разгрузки уменьшается по длине и охватывает вывод, а сжимаемый в поперечном сечении при накрутке вывод в процессе разгрузки увеличивается по ширине и при этом увеличивает контактное напряжение с проводом. После прекращения накрутки у одного из углов провод должен касаться стороны вывода, а чтобы он не отходил от другого угла положение его должно быть зафиксировано в положении близком к его параллельному расположению по отношению к оси проводника и стороны вывода. Провод при этом самоблокируется. При монтаже накруткой применяют три вида соединений: обычное (немодифицированное), модифицированное и бандажное (рис. 1).

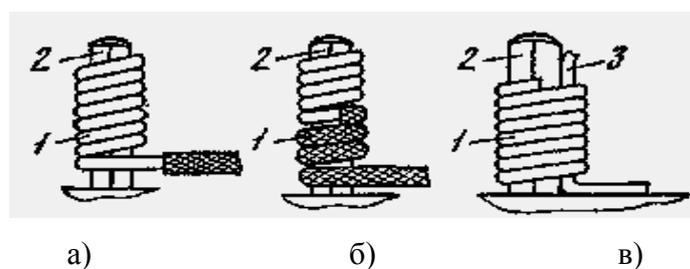


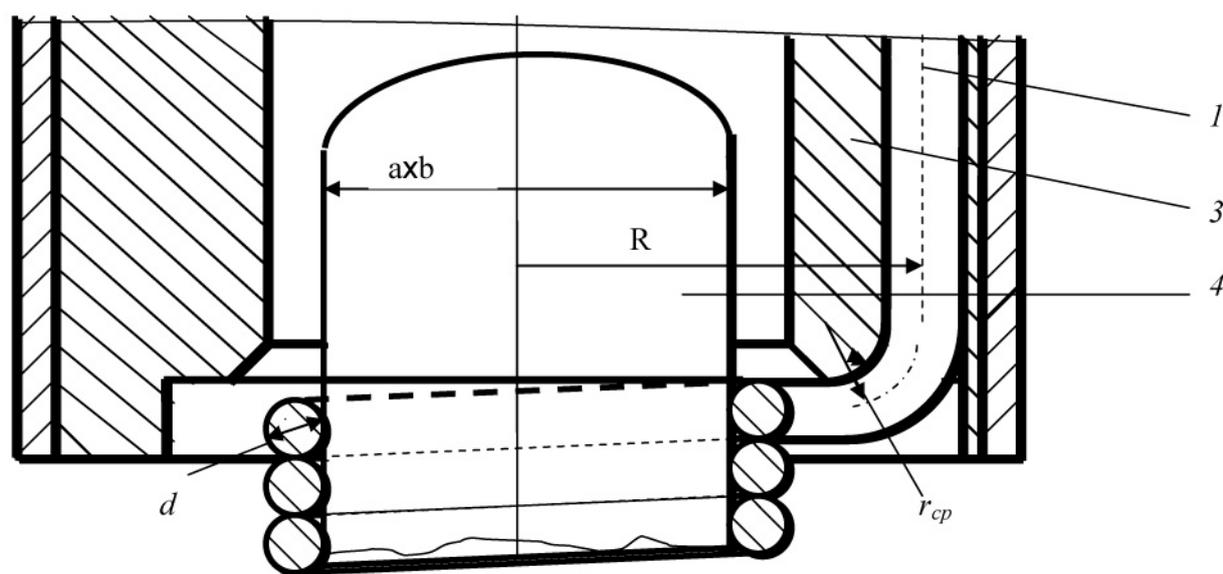
Рис. 1. Виды соединения проводов методом накрутки: *а* - немодифицированное соединение; *б* - модифицированное соединение; *в* – бандажное соединение; 1–проводник, 2-вывод, 3- бандажируемый элемент

Если на штыре производится не одна, а три накрутки, каждая из последующих накруток ослабляет предыдущую на 10...20 %. Если соотношение размеров поперечного сечения вывода и диаметра и пластичности провода выбраны неправильно, первая (нижняя) накрутка может оказаться настолько ослабленной, что сойдет с вывода. Но и при

правильном выборе соотношения этих размеров первая накрутка ослабляется из-за деформации вывода второй накруткой на 20 %, третьей накруткой — на 30 %. Но оставшиеся напряжения, удерживающие на выводе первую накрутку, достаточны для обеспечения прочности и надежности соединения.

Сегодня накрутка широко используется для реализации переменной части монтажа на унифицированных платах, когда нужно создавать модификации изделий за счет добавления связей к общей для всех модификаций массе соединений. Доля соединений, добавляемых накруткой, в этом случае не превышает 10 %. Крупные коммутационные блоки и стойки аппаратуры связи монтируются таким образом.

В процессах электромонтажа методом накрутки (рис. 2,а) возникают следующие силовые и деформационные процессы. Провод 1 без усилия свободно вытягивается из бокового отверстия 2 наматывающего валика 3 и с определённым осевым усилием изгибается при входе на тороидальную кромку с радиусом r_{cp} наматывающего валика, затем с определённым осевым усилием выпрямляется (изгибается) при сходе с него, затем изгибается под углом 90° на каждом ребре вывода 4 при вращении наматывающего валика 3 вокруг оси этого вывода, при этом в наматываемый провод врезаются острые кромки вывода 4 под действием растягивающего осевого усилия накрутки. Так как в проводе при изгибе возникают осевые растягивающие и, как их следствие, контактные напряжения между проводником и наматывающим валиком, то возникают силы трения на тороидальной поверхности наматывающего валика и проводника.



а)

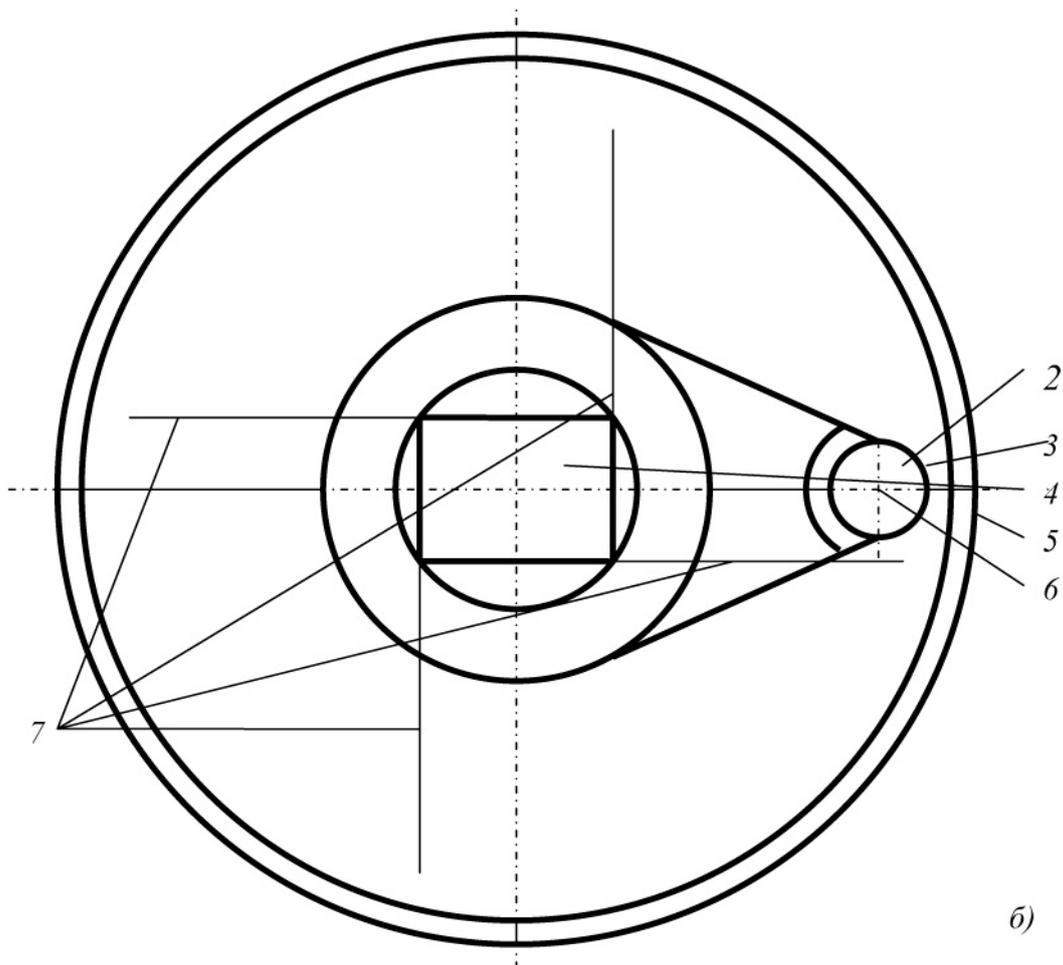


Рис. 2. Схема электромонтажа методом накрутки; а – продольно-осевой разрез; б– вид снизу (без проводника); 1– проводник, 2– отверстие для проводника, 3– накручивающий валик, 4 – вывод, 5 – втулка, 6 – ось бокового отверстия наматывающего валика, 7 – линии продолжения сторон вывода

Контакт острых кромок вывода с проводником начинается с того момента, когда ось бокового отверстия наматывающего валика при накрутке смещается с осевой линии проводника параллельной линии 7 (рис. 2,б), являющейся продолжением сторон вывода. Составляющая усилия натяжения провода, параллельная стороне вывода, увеличивается от некоторого значения до максимальной величины при подходе оси бокового отверстия наматывающего валика к линии продолжения стороны вывода. Вторая составляющая, перпендикулярная ей, увеличивается от некоторого значения до максимальной величины при совпадении оси бокового отверстия наматывающего валика с осью симметрии вывода в поперечном сечении, а затем уменьшается до некоторой величины при совпадении оси бокового отверстия наматывающего ролика с линией продолжения стороны вывода. Если первая составляющая обеспечивает врезание вывода в проводник, то вторая составляющая прижимает проводник к выводу, а её увеличение способствует

пластическому деформированию смятием проводника в месте контакта его с выводом и увеличению поверхности контакта.

Силовые параметры процесса накрутки. При выходе прямого проводника из бокового отверстия накручивающего валика проводник изгибается на границе тороидальной поверхности с радиусом r_{cp} . Дальнейшее перемещение проводника по тороидальной поверхности происходит с преодолением только сил трения без изменения кривизны срединного сечения проводника в меридиональном сечении. А при выходе проводника с тороидальной поверхности на границе криволинейного участка с прямолинейным торцовым участком наматывающего валика при спрямлении проводника возникает дополнительное растягивающее меридиональное напряжение. Величину его определим на основе равенства работ. Согласно этому положению работа растягивающего напряжения, возникающего при изгибе проводника на угле его поворота, должна быть равна произведению осевого напряжения в нём с учётом трения на площадь сечения заготовки и пути перемещения элемента заготовки.

В технологической системе электромонтажа накруткой главным элементом процесса, определяющим силовые параметры процесса является упругопластический контакт провода с выводом. Эти силовые параметры являются основой при расчёте геометрических и силовых параметров накручивающего устройства.

Для определения силовых параметров контакта провода с выводом приведена на рис 3 схема, где справа и слева от ребра вывода представлено взаимодействие проводника с ним и показаны приближённые эпюры распределения контактных напряжений

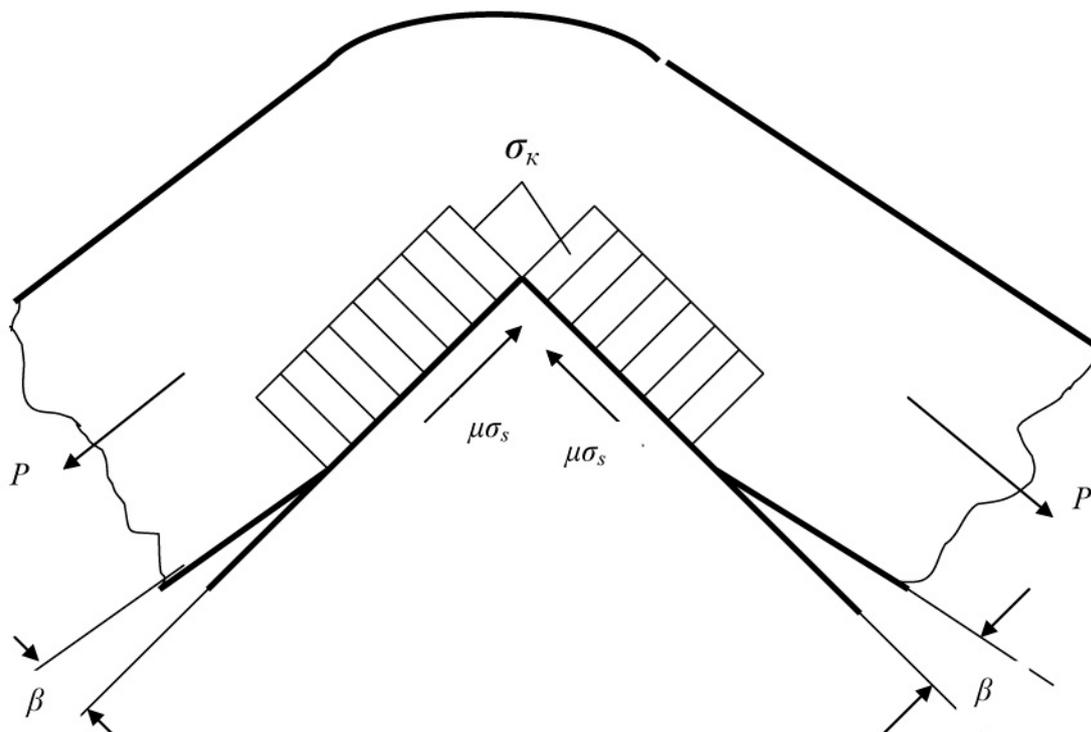


Рис. 3. Эпюры контактных напряжений к определению напряжения в проводнике при накрутке

Можно предположить что, для обеспечения надёжного контакта с минимальным переходным электрическим сопротивлением напряжения равномерно распределены по поверхности контакта и величина их должна несколько превышать предел текучести материала проводника с учётом некоторого упрочнения материала проводника; так как общая величина степени деформации незначительна. При этом возникают нормальные - σ_k и касательные - $\mu\sigma_s$ напряжения. Минимальные и максимальные напряжения натяжения определим на основе следующих соображений. Минимальная средняя величина контактного напряжения может быть равна пределу упругости – начальной величине предела текучести $\sigma_y \approx \sigma_T$ (или его части, например, $0,5 \sigma_T$). При этом некоторая часть микронеровностей вывода и проводника испытывает упругие напряжения в пределах – более 0 и $\leq \sigma_y$ (σ_y - предел текучести), другая часть микронеровностей при этом пластически деформирована. Максимальная величина контактных напряжений должна быть не более величины предела прочности - σ_B материала проводника.

Определим соответствующие этим величинам контактных напряжений минимальную и максимальную величину напряжения натяжения и другие параметры.

Соответственно действию минимальных и максимальных напряжений получаем минимальную и максимальную деформацию и внедрение h_y и h_T (рис. 4) вывода в проводник равные:

$$h_y = \frac{\sigma_T}{E} d, \quad h_T = \frac{\sigma_B}{E} d, \quad (1,а,б),$$

где E – модуль упругости первого рода материала проводника, d – диаметр проводника; σ_T и σ_B – предел текучести и предел прочности материала проводника.

Из геометрических соображений - прямоугольного треугольника рис. 4 также определим значение этого внедрения, оно равно:

$$h = d (1 - \cos \alpha/2) / 2. \quad (2)$$

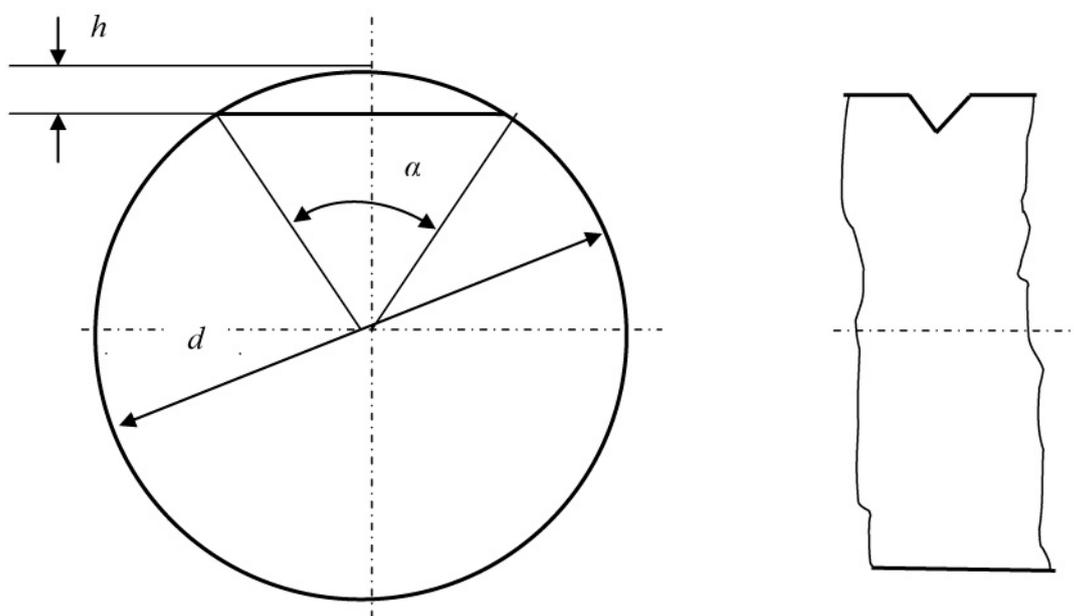


Рис.4. Схема к определению площади контакта проводника с выводом

Поочередно приравняв каждое из выражений (1) выражению (2) получим уравнение, из которого можно определить величину угла контакта проводника с выводом:

$$2 \frac{\sigma_T}{E} d = d(1 - \cos \frac{\alpha_T}{2}), \quad 2 \frac{\sigma_B}{E} d = d(1 - \cos \frac{\alpha_B}{2}), \quad (3,а,б)$$

Из выражений (3а, б) определяем значение косинуса и необходимую для дальнейших расчетов величину угла α :

$$\cos \frac{\alpha_T}{2} = 1 - \frac{2h_T}{d}, \quad \cos \frac{\alpha_B}{2} = 1 - \frac{2h_B}{d}, \quad (4а)$$

$$\alpha_T = 2 \arccos \left(1 - \frac{2h_T}{d} \right), \quad \alpha_B = 2 \arccos \left(1 - \frac{2h_B}{d} \right), \quad (4б)$$

где α_T и α_B – соответственно угол контакта проводника с выводом при напряжении меньше предела текучести и меньше предела прочности материала проводника, т.е. предельные значения угла.

Для определения значения силовых параметров накрутки провода на вывод рассмотрим взаимодействие проводника с выводом при начальном и минимальном их пластическом взаимодействии. Наибольшее контактное усилие провода с выводом будет в тот момент, когда ось провода при накрутке и сторона вывода будут на одной линии. Распределение нормальных – σ_k и касательных (трения) – $\mu\sigma_k$ напряжений (см. рис. 3) на контактных поверхностях провода и вывода приближённо примем равномерным. На основе этих соображений принимаем по всей контактной поверхности напряжение равным напряжению текучести материала проводника $\sigma_y \approx \sigma_T$.

Усилие натяжения проводника при накрутке вблизи острой кромки вывода при проектировании сил на направление натяжения равно:

$$P = \sigma_{\Sigma} f_k (1 + \mu), \quad (5)$$

где μ – коэффициент трения медного проводника по валику, σ_{Σ} – контактное напряжение, которое принимаем равным σ_T , f_k – величина поверхности контакта проводника с выводом, которая представляет собой проекцию поверхности кругового сегмента f_{c2} на поверхности, расположенные под углом 45° к оси проводника (поперечное сечение вывода – прямоугольник). Поверхность сегмента f_{c2} определим по приближённой формуле (угол α меньше 50°): $f_{c2} = \frac{2}{3}ah = \frac{4}{3}r^2 \sin(\alpha/2) \cdot (1 - \cos(\alpha/2))$, где a – длина хорды сегмента, h – стрелка сегмента, α – центральный угол контакта вывода с проводником в градусах (см. рис. 4), рассматриваемый в поперечном сечении проводника.

Поверхность двух наклонённых под углом 45° сегментов равна:

$$f_k = \frac{16}{3\pi\sqrt{2}} r^2 \sin(\alpha/2) (1 - \cos(\alpha/2)). \quad (6)$$

При этом минимальная и максимальная величина усилия натяжения равна:

$$P_{\text{мин}} = \sigma_T (1 + \mu) \cdot \frac{16}{3\pi\sqrt{2}} r^2 \sin(\alpha_T/2) (1 - \cos(\alpha_T/2)), \quad P_{\text{макс}} = \sigma_B (1 + \mu) \cdot \frac{16}{3\pi\sqrt{2}} r^2 \sin(\alpha_B/2) (1 - \cos(\alpha_B/2)), \quad (7, \text{а.б})$$

где σ_T и σ_B – предел текучести и временное сопротивление материала проводника.

Максимальная средняя величина контактного напряжения должна быть не больше предела пластичности σ_T (при этом некоторая часть микронеровностей вывода и проводника испытывает упругие напряжения в пределах $0 \leq \sigma_T$):

Величина минимального и максимального натяжения в проводнике с учётом увеличения напряжения при входе и сходе с тороидальной кромки за счёт изгиба и спрямления его у выхода с тороидальной поверхности наматывающего ролика - напряжения между наматывающим роликом и штырём-выводом, на который наматывается проводник, равна:

$$\sigma_{\min} = \frac{4P_{\min}}{\pi d^2} = \sigma_T (1 + \mu) \cdot \frac{16}{3\pi\sqrt{2}} r^2 \sin(\alpha_T/2) (1 - \cos(\alpha_T/2)), \quad (8a)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{4P_{\max}}{\pi d^2} = \sigma_B (1 + \mu) \cdot \frac{16}{3\pi\sqrt{2}} r^2 \sin(\alpha_B/2) (1 - \cos(\alpha_B/2)), \quad (8б)$$

где σ_{\min} и σ_{\max} – соответственно наименьшее и наибольшее напряжение накрутки; наименьшее напряжение обеспечивает такое натяжение проводника, которое обеспечивает формование его по контуру вывода и герметичный контакт проводника с выводом; наибольшее напряжение - это натяжение в проводнике, при котором возможен его разрыв.

Напряжение натяжения – σ_n , обеспечивающее формование витка и нужный контакт вывода с проводником, создаётся на тороидальной поверхности накручивающего валика на радиусе r_{cp} при изгибе и спрямлении проводника с учётом трения, оно равно:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_{TP} d}{4r_{cp}} \cdot e^{\pi/2} + \frac{\sigma_{TP} d}{4r_{cp}} = \frac{\sigma_{TP} d}{r_{cp}} (1 + e^{\mu \cdot \frac{\pi}{2}}). \quad (9),$$

где σ_{TP} – напряжение натяжения проводника, вызываемое изгибом при входе на тороидальную поверхность натяжного валика, $r_{cp} = r + 0,5d$, r – тороидальной поверхности накручивающего валика, d - диаметр проводника.

На основе равенства напряжений по выражениям (8) и (9):

$$\frac{\sigma_{TP}}{4} \cdot \frac{d}{r_{cp}} \left(1 + e^{\mu \cdot \frac{\pi}{4}} \right) = \sigma_{TK} \frac{16}{3 \cdot \pi \cdot \sqrt{2}} \cdot (1 + \mu) \cdot \sin\left(\frac{\alpha_T}{2}\right) \cdot \left(1 - \cos\frac{\alpha_T}{2} \right),$$

$$\frac{\sigma_{TP}}{4} \cdot \frac{d}{r_{cp}} \left(1 + e^{\mu \cdot \frac{\pi}{4}} \right) = \sigma_{BK} \frac{16}{3 \cdot \pi \cdot \sqrt{2}} \cdot (1 + \mu) \cdot \sin\left(\frac{\alpha_B}{2}\right) \cdot \left(1 - \cos\frac{\alpha_B}{2} \right)$$

определим относительную величину радиуса тороидальной поверхности накручивающего валика:

$$\frac{r_{cp}^{мин}}{d} = \frac{\sigma_{TP}}{\sigma_{TK}} \cdot \frac{3 \cdot \pi \cdot \sqrt{2} \cdot \left(1 + e^{\frac{\mu \cdot \pi}{4}}\right)}{64 \cdot (1 + \mu) \cdot \sin\left(\frac{\alpha_T}{2}\right) \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{\alpha_T}{2}\right)\right)},$$

$$\frac{r_{cp}^{мак}}{d} = \frac{\sigma_{TP}}{\sigma_{BK}} \cdot \frac{3 \cdot \pi \cdot \sqrt{2} \cdot \left(1 + e^{\frac{\mu \cdot \pi}{4}}\right)}{64 \cdot (1 + \mu) \cdot \sin\left(\frac{\alpha_B}{2}\right) \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{\alpha_B}{2}\right)\right)}, \quad (10,а, б)$$

Из этих выражений следует, что относительная величина радиуса тороидальной поверхности накручивающего валика увеличивается с увеличением трения между валиком и проводником и увеличением предела текучести материала проводника, т.е. с увеличением его прочности и наоборот.

Пример расчёта. Дано. Медный проводник, его силовые характеристики – $\sigma_T = 550$ МПа, $\sigma_B = 2200$ МПа, $E = 1,1 \cdot 10^6$ МПа; $\mu = 0,15$, угол рабочей части тороидальной поверхности накручивающего валика равен 90° . Расчётные величины: по формулам (4,а) и (4,б) определяем $\cos(\alpha^{мак}/2) = 0,999$, $\cos(\alpha^{мин}/2) = 0,996$ и соответственно $\alpha^{мак}/2 = 2^\circ 30'$, $\alpha^{мин}/2 = 5^\circ 10'$, $\sin(\alpha^{мак}/2) = 0,0436$, $\sin(\alpha^{мин}/2) = 0,0901$; по формулам (10,а,б) определяем $r_{cp}^{мак}/d = 4,98$, $r_{cp}^{мин}/d = 9,36$; по формулам (7,а,б) определяем усилие $P_{мак} = 0,390 \sigma_T r^2$, $P_{мин} = 0,189 \sigma_T r^2$, а напряжения – по формулам (8,а,б) $\sigma_H^{мак} = 0,124 \sigma_T$, $\sigma_H^{мин} = 0,060 \sigma_T$.

Расчёт показывает, минимальная и максимальная величина этого соотношения находится в пределах 4,98...9,36, округляем их 5...9, а радиус тороидальной поверхности соответственно 4...8. Так как механические свойства материала проводника не строго постоянны, а изменяются в некоторых пределах (до 15%), то необходимо принимать некоторую среднюю величину большую минимальной и меньшую максимальной – назовём её оптимальной. Примем за основу для этого случая среднюю арифметическую величину: $r_{cp}^{opt}/d = (r_{cp}^{мак}/d + r_{cp}^{мин}/d)/2$. Таким образом получаем радиус валика равный: $r = 6$. Другие параметры определяем по ранее приведённым формулам [3] для максимальной величины исходных параметров.

В завершение отметим, что это исследование наиболее полно и обоснованно обеспечивает возможность определения наиболее важных для проектирования процесса электромонтажа способом накрутки параметров.

Список литературы

1. Медведев А.М. Непаяные методы неразъёмных соединений: накрутка // Технологии в электронной промышленности. 2006. № 3. С. 52-55.
2. Алексеев В.Г., Гриднев В.Н., Нестеров Ю.И. и др. Технология ЭВА, оборудование и автоматизация. М.: Высшая школа, 1984. 392 с.
3. Ковалев В.Г., Ковалёв С.В. Основные расчетные параметры электромонтажа методом накрутки // Технологии в электронной промышленности. 2008. № 8. С. 43-47.

Tool radius in wire-wrap method

10, October 2012

DOI: 1012.0465668

Kovalev V.G., Kovalev S.V.

Russia, Bauman Moscow State Technical University

ksv.ibm@bk.ru

In this article the authors consider a well-known but still theoretically not grounded wire-wrap method. To solve this problem, the authors use actual conditions for formation and ensuring a hard close contact of connected elements, - namely, their elastic-plastic deformation and expected state of the process at the final moment. The authors supposed that provision of this contact will be achieved if the contact stress on the surface of the connected elements is not less than the elastic limit value and not higher than the ultimate stress value of the contacting materials. The paper presents the data for estimation by calculating the radius of the winding cylinder. Thus, radius of the winding cylinder is defined. Previously, this problem was solved only by selection.

Publications with keywords: [stress](#), [account](#), [electrical installation](#), [churning](#), [tension](#), [radius](#), [for the first time](#)

Publications with words: [stress](#), [account](#), [electrical installation](#), [churning](#), [tension](#), [radius](#), [for the first time](#)

References

1. Medvedev A.M. Nepaianye metody neraz"emnykh soedinenii: nakrutka [Not brazed methods of permanent joints: winding]. *Tekhnologii v elektronnoi promyshlennosti* [Technologies in Electronic Industry], 2006, no. 3, pp. 52-55.
2. Alekseev V.G., Gridnev V.N., Nesterov Iu.I., et al. *Tekhnologiya EVA, oborudovanie i avtomatizatsiya* [EVA technology, equipment and automation]. Moscow, Vysshaia shkola, 1984. 392 p.
3. Kovalev V.G., Kovalev S.V. Osnovnye raschetnye parametry elektromontazha metodom nakrutki [Key calculated parameters of electrical installation by method of winding]. *Tekhnologii v elektronnoi promyshlennosti* [Technologies in Electronic Industry], 2008, no. 8, pp. 43-47.