ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДОЗИРОВАНИЯ И ДВИЖЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННОГО МАНИПУЛЯТОРА ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ КЛЕЯ С УЧЁТОМ СКОРОСТИ КОНВЕЙЕРА

Бозоров Рустам Расулович
БГТУ, Стажер-исследователь, кафедра технологических машин и оборудования

Аннотация. В статье рассмотрена задача обоснования параметров дозирования и движения, обеспечивающих требуемую геометрию клеевого шва при нанесении клея роботизированным манипулятором на детали, перемещающиеся по конвейеру. На основе закона сохранения массы получена зависимость между площадью поперечного сечения шва, объёмным расходом и скоростью сопла относительно детали. С учётом неньютоновской (степенной) реологии клея определены потери давления в сопле и показана высокая чувствительность дозирования по схеме «время–давление» к изменению вязкости. Для предотвращения утолщения шва на участках снижения скорости в углах траектории предложен закон управления расходом, пропорциональный скорости, с компенсацией инерционности дозатора.

Ключевые слова: нанесение клея, дозирование, геометрия шва, неньютоновская жидкость, объёмный расход, слежение за конвейером, профиль скорости, роботизированный манипулятор.

Annotatsiya. Maqolada konveyerda harakatlanayotgan detallarga robotli manipulyator yordamida yelim surtishda talab etilgan chok geometriyasini ta'minlovchi dozalash va harakat parametrlarini asoslash masalasi ko'rib chiqilgan. Massaning saqlanish qonuni asosida chok kesim yuzasi, hajmiy sarf va soplaning detalga nisbatan tezligi o'rtasidagi bog'lanish olingan. Yelimning nonyuton (darajali qonun) reologiyasini hisobga olib, soplodagi bosim yo'qotilishi aniqlangan va bosim–vaqt usulida dozalashning qovushqoqlik o'zgarishiga yuqori sezgirligi ko'rsatilgan. Burchaklarda tezlik pasayganda chok qalinlashishining oldini olish uchun tezlikka proporsional dozalash va dozator inersiyasini kompensatsiyalash qonuni taklif etilgan.

Kalit so'zlar: yelim surtish, dozalash, chok geometriyasi, nonyuton suyuqlik, hajmiy sarf, konveyerni kuzatish, tezlik profili, robotli manipulyator.

Abstract. The paper substantiates the dispensing and motion parameters that ensure the required bead geometry when a robotic manipulator applies adhesive to parts moving on a conveyor. Based on mass conservation, a relationship between bead cross-section, volumetric flow rate and nozzle speed relative to the part is derived. Taking into account the non-Newtonian (power-law) rheology of the adhesive, the pressure drop in the nozzle is determined and the high sensitivity of time–pressure dispensing to viscosity variation is shown. To prevent bead thickening where the speed drops at corners, speed-proportional dispensing with compensation of the dispenser lag is proposed.

Keywords: adhesive dispensing, bead geometry, non-Newtonian fluid, volumetric flow rate, conveyor tracking, velocity profile, robotic manipulator.

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

Введение

Модернизация промышленности и автоматизация производственных процессов являются одним из приоритетных направлений Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы [1]. Клеевые соединения широко применяются в автомобилестроении, производстве бытовой техники и электротехнической промышленности как альтернатива сварке и механическому крепежу [2, 3]. Прочность и герметичность соединения во многом определяются геометрией клеевого шва — его шириной, высотой и стабильностью по длине [3].

Основными дефектами при роботизированном нанесении клея являются разрывы шва, скопление клея в углах траектории, образование капель в начале и конце шва, а также смещение шва относительно заданной траектории. Их основные причины — рассогласование скорости сопла и расхода клея, изменение вязкости клея под действием температуры и инерционность дозатора. При движущемся конвейере к ним добавляются колебания скорости конвейера.

Настоящая работа является частью диссертационного исследования на тему «Разработка роботизированного манипулятора для нанесения клея на конвейерной сборочной линии и обоснование его параметров». **Цель исследования** — обоснование параметров дозирования и движения, обеспечивающих заданную геометрию шва, во взаимосвязи со скоростью конвейера.

Методы исследования

Поперечное сечение шва принято в форме полуэллипса. Площадь сечения A выражается через ширину шва w и высоту h. Согласно закону сохранения массы она связана с объёмным расходом клея Q и скоростью сопла относительно поверхности детали v_s:

$$A=\frac{\pi}{4} w h, \qquad Q=A v_s \;\Rightarrow\; w=\frac{4Q}{\pi h v_s}. \tag{1}$$

При установке сопла на высоте h_0, близкой к высоте шва ($h_0 \approx h$), высота шва определяется в основном положением сопла, а ширина — отношением Q/v_s. Следовательно, основное условие стабильности геометрии шва — постоянство отношения Q/v_s по всей траектории.

В режиме слежения за конвейером геометрию шва определяет не скорость сопла относительно основания манипулятора, а его скорость относительно детали:

$$v_s(t)=\left| \dot{\mathbf{p}}_s(t)-v_k(t)\,\mathbf{e}_x \right|, \tag{2}$$

где $\dot{\mathbf{p}}_s$ — скорость конца сопла в системе координат основания; v_k — скорость конвейера; $\mathbf{e}_x$ — единичный вектор направления движения конвейера.

Большинство конструкционных клеев и герметиков обладают псевдопластичными свойствами (разжижаются при сдвиге). Их реология описывается степенным законом Оствальда–де Виля [4, 5]:

$$\tau=K\dot{\gamma}^{n}, \qquad 0<n<1, \tag{3}$$

где K — коэффициент консистенции, Па·с^n; n — индекс течения. Для ламинарного течения в цилиндрическом сопле радиусом R и длиной L расход, потери давления и скорость сдвига на стенке связаны соотношениями [4, 5]:

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

$$Q=\frac{\pi n R^3}{3n+1}\left(\frac{R\,\Delta P}{2KL}\right)^{1/n} \Rightarrow \Delta P=\frac{2KL}{R}\left(\frac{(3n+1)\,Q}{\pi n R^3}\right)^{n}, \qquad (4)$$

$$\dot{\gamma}_w=\frac{(3n+1)\,Q}{\pi n R^3}.$$

При n = 1 эти выражения переходят в формулу Хагена–Пуазейля для ньютоновской жидкости. Закон движения планируется на основе S-образного профиля скорости с ограничением рывка [6, 7].

Результаты и обсуждение

Выбор способа дозирования. При постоянном давлении из степенного закона следует зависимость расхода от коэффициента консистенции:

$$\frac{Q}{Q_0}=\left(\frac{K_0}{K}\right)^{1/n}. \qquad (5)$$

При n = 0,5 уменьшение вязкости клея всего на 10 % под действием температуры увеличивает расход на 23 %. Следовательно, дозаторы, работающие по схеме «время–давление», без строгой термостабилизации клея не могут обеспечить требуемую точность. Поэтому для проектируемого манипулятора выбран объёмный (поршневой или винтовой) дозатор, расход которого практически не зависит от вязкости.

Дозирование, пропорциональное скорости. На прямолинейных участках траектории скорость сопла постоянна, а в углах она ограничена допустимым нормальным ускорением $a_{n,max}$:

$$v_\rho \le \sqrt{a_{n,max}\,\rho}, \qquad (6)$$

где ρ — радиус кривизны траектории. При постоянном расходе площадь сечения шва в месте снижения скорости увеличивается в v_s/v_ρ раз; эта зависимость показана на рис. 1.

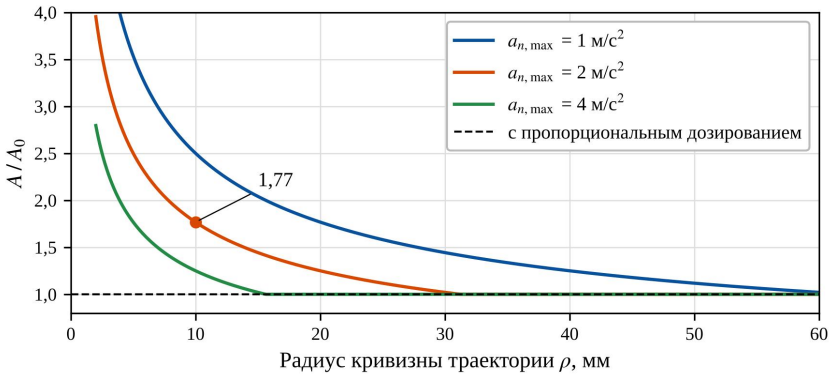


Рис. 1. Относительное увеличение площади сечения шва в зависимости от радиуса кривизны траектории при постоянном расходе (v_s = 0,25 м/с)

Для предотвращения утолщения шва расход дозатора регулируется пропорционально относительной скорости сопла. Рассматривая дозатор как инерционное звено первого порядка с постоянной времени τ_d, получаем закон управления, компенсирующий его запаздывание:

$$Q^*(t)=A_0[\,v_s(t)+\tau_d\,\dot{v}_s(t)\,], \qquad (7)$$

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

где Q^* — задание расхода дозатору; A_0 — требуемая площадь сечения шва. Структурная схема системы управления дозированием приведена на рис. 2. В начале шва подача клея включается раньше начала движения на время задержки открытия сопла t_{on} , а в конце отключается на расстоянии $s_{off}=v_s t_{off}$ до конца траектории. Это уменьшает образование капель в начале и конце шва.

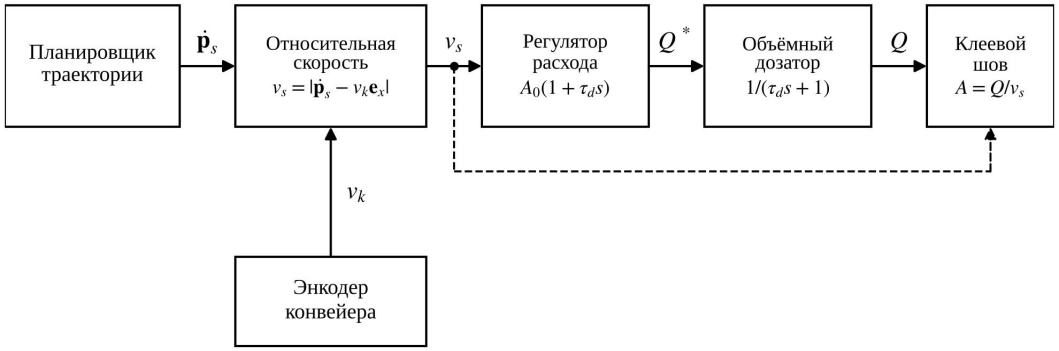


Рис. 2. Структурная схема системы управления дозированием при слежении за конвейером

Влияние колебаний скорости конвейера. Относительная погрешность площади сечения шва выражается через погрешности расхода и относительной скорости:

$$\frac{\delta A}{A} \approx \frac{\delta Q}{Q} - \frac{\delta v_s}{v_s}. \qquad (8)$$

При v_k = 0,08 м/с и колебаниях скорости конвейера на 5 %, не учитываемых манипулятором, погрешность относительной скорости составляет 0,004/0,25 = 1,6 %, т. е. влияние на площадь сечения невелико. Однако при длительности нанесения шва T_s = 7 с смещение шва относительно детали достигает 0,004 · 7 = 0,028 м, т. е. 28 мм. Это значительно превышает, например, допуск на положение ±1 мм, поэтому положение конвейера необходимо отслеживать не по времени, а по сигналу энкодера.

Пример расчёта. Результаты расчёта для манипулятора SCARA со звеньями $l_1=l_2$ = 400 мм и шва длиной $L_ш$ = 1,6 м по периметру детали размером 500 × 300 мм приведены в табл. 1. Реологические параметры клея K = 200 Па·с^n и n = 0,5 приняты в качестве примера; для выбранной марки клея они подлежат определению реометрическими измерениями.

Таблица 1

Расчётные значения параметров нанесения клея

Параметр	**Обозначение**	**Значение**
Ширина × высота шва	w×*h*	4,0 × 2,5 мм
Площадь сечения шва	A_0	7,85 мм²
Относительная скорость сопла (прямой участок)	v_s	250 мм/с
Объёмный расход (прямой участок)	Q	1,96 мл/с
Внутренний диаметр × длина сопла	d×L	2,5 × 25 мм
Скорость сдвига на стенке	$\dot{\gamma}_w$	1600 с$^{-1}$
Потери давления в сопле	ΔP	0,32 МПа

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

Параметр	Обозначение	Значение
Скорость в углу (ρ = 10 мм, $a_{n,max}$ = 2 м/с²)	$v_ρ$	141 мм/с
Путь торможения перед углом (a_t = 2 м/с²)	s_t	11 мм
Расход в углу (при пропорциональном дозировании)	$Q_ρ$	1,11 мл/с
Расход клея на одну деталь	V	12,6 мл

Без пропорционального дозирования в углу с ρ = 10 мм площадь сечения шва увеличивается в 250/141 = 1,77 раза, т. е. на 77 %. При предложенном законе управления расход снижается до 1,11 мл/с, и площадь сечения сохраняется равной A_0. Потери давления в сопле 0,32 МПа не ограничивают выбор объёмного дозатора.

Заключение

1. Показано, что ширина шва определяется отношением Q/v_s. В режиме слежения за конвейером в качестве v_s должна приниматься скорость сопла относительно детали, а не относительно основания манипулятора.

2. На основе степенного закона определены потери давления в сопле (в примере 0,32 МПа). Показано, что при n = 0,5 изменение вязкости на 10 % изменяет расход дозатора «время–давление» на 23 %; обосновано применение объёмного дозатора.

3. Предложен закон управления расходом, пропорциональный скорости и компенсирующий запаздывание дозатора, который предотвращает утолщение шва в углах. Установлено, что без компенсации в углу с ρ = 10 мм площадь сечения шва возрастает на 77 %.

4. Показано, что при колебаниях скорости конвейера на 5 % и слежении по времени шов может сместиться до 28 мм; обоснована необходимость слежения по сигналу энкодера.

5. Полученные зависимости подлежат экспериментальной проверке на стенде путём измерения геометрии клеевого шва.

Список литературы

1. Указ Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 г. № УП-60 «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы».
2. Pocius A.V. Adhesion and Adhesives Technology: An Introduction. 3rd ed. – Munich: Hanser, 2012.
3. Habenicht G. Applied Adhesive Bonding: A Practical Guide for Flawless Results. – Weinheim: Wiley-VCH, 2009.
4. Bird R.B., Stewart W.E., Lightfoot E.N. Transport Phenomena. 2nd ed. – New York: Wiley, 2002.
5. Chhabra R.P., Richardson J.F. Non-Newtonian Flow and Applied Rheology: Engineering Applications. 2nd ed. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2008.
6. Biagiotti L., Melchiorri C. Trajectory Planning for Automatic Machines and Robots. – Berlin: Springer, 2008.
7. Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G. Robotics: Modelling, Planning and Control. – London: Springer, 2009.

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.